

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016

Filip Komárek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

DEGRADACE KAPALNÝCH IZOLANTŮ PRO VYSOKÉ NAPĚTÍ

DEGRADATION OF LIQUID INSULATORS FOR HIGH VOLTAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Komárek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a
komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Filip Komárek

Ročník: 3

ID: 164306

Akademický rok: 2015/2016

NÁZEV TÉMATU:

Degradace kapalných izolantů pro vysoké napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše v dané problematice.
2. Požadavky a zkušební postupy vyplývající z platných norem.
3. Používané principy.
4. Určení degradace olejů pomocí mikroskopu.
5. Laboratorní měření elektrické pevnosti kapalných dielektrik.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Degradace kapalných izolantů pro vysoké napětí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně 24.5.2016

.....
Filip Komárek

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Krbalovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní práce.

V Brne 24.5 2016

.....

Filip Komárek

Bibliografická citace práce:

KOMÁREK, F. *Degradace kapalných izolantů pro vysoké napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal, Ph.D..

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou kvapalinových izolantov. Predovšetkým sa zaoberá diagnostickými skúškami transformátorového oleja. Diagnostické skúšky sú nutné pre zistenie stavu oleja a pre určenie parametrov oleja. Stav používaného oleja určuje jeho druh degradácie a pokročilosť degradácie. Pre určenie degradácie je nutné vedieť základné zloženie oleja, aby bolo možné určiť ako sa zmenili štruktúry oleja a čo olej neobsahoval pred používaním. Pre určenie základných elektrických vlastností oleja, sa využívajú diagnostické skúšky ako elektrická pevnosť a stratový činiteľ. V tejto práci je okrem súhrnu diagnostických skúšok pozorovanie minerálneho oleja s neznámym stupňom degradácie a správanie sa prímiesi v minerálnom oleji po priložení elektrického poľa.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: Kvapalinové izolanty, transformátorový olej, silikónový olej, minerálny olej, degradačné deje, diagnostické skúšky, elektrická pevnosť, stratový činiteľ, kapacita oleja, elektrické prierazy, sadze, nečistoty v oleji, pohyb nečistôt v oleji, prúdenie oleja, elektrické pole

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with measurement of liquid insulators. Mainly it deals with diagnostic tests of transformer oil. Diagnostic tests are needed to identify oil status and to determine the parameters of the oil. The status of the used oil determines its type of degradation and progress of degradation. For the determination of degradation it is necessary to know the composition of the essential oil, to determine how it has changed the structure of the oil and the oil did not contain before use. To determine the basic electrical properties of the oil are used in diagnostic tests such as dielectric strength and dissipation factor. This work is in addition to a summary of diagnostic tests observation of mineral oil with an unknown degree of degradation and behavior of impurities in mineral oil once the electric field.

KEY WORDS:

The liquid insulators, transformer oil, silicon oil, mineral oil, degradation happens, the diagnostic tests, electric strength, dissipation factor, the oil capacity, electrical breakdown, carbon black, impurities in oil, the movement of impurities in the oil, the oil flow, electric field

OBSAH

OBSAH	3
ZOZNAM OBRÁZKOV	5
ZOZNAM TABULIEK	7
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	8
ÚVOD	9
1 TEORETICKÁ ČASŤ	10
1.1 TRANSFORMÁTOROVÝ OLEJ	10
1.1.1 MINERÁLNE OLEJE.....	10
1.1.2 SILIKÓNOVÉ OLEJE.....	12
1.2 DEGRADAČNÉ PROCESY TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJA	13
1.2.1 OXIDAČNÁ DEGRADÁCIA TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJA.....	13
1.2.2 TEPELNÁ DEGRADÁCIA TRANSFORMÁTOROVÉHO OLEJA.....	14
1.2.3 DEGRADÁCIA VPLYVOM CUDZÍCH LÁTOK.....	14
1.2.4 ÚČINKY KALOV.....	14
1.2.5 DEGRADÁCIA VPLYVOM ELEKTRICKÝCH VÝBOJOV OLEJI.....	14
1.3 ODBER VZORIEK OLEJA	16
1.4 DIAGNOSTIKA OLEJA	17
1.4.1 FARBA A VZHĽAD OLEJA.....	17
1.4.2 VISKOZITA.....	17
1.4.3 BOD VZPLANUTIA.....	19
1.4.4 BOD TUHNUTIA.....	19
1.4.5 OBSAH VODY V OLEJI.....	20
1.4.6 USADENINY A ROZPUSTNÉ KALY.....	20
1.4.7 MIKROSKOPICKÉ URČENIE VEĽKOSTI A POČTU ČASTÍC NEČISTÔT.....	20
1.4.8 ČÍSLO KYSLOSTI.....	21
1.4.9 MEDZIPOVRCHOVÉ NAPÄTIE.....	21
1.4.10 OXIDAČNÁ STABILITA.....	22
1.4.11 OBSAH INHIBÍTORA.....	22
1.4.12 ELEKTRICKÁ PEVNOSŤ.....	22
1.4.13 STRATOVÝ ČINITEL A RELATÍVNA PERMITIVITA.....	23
1.4.14 HUSTOTA.....	25
1.4.15 VNÚTORNÁ REZISTIVITA.....	25
1.4.16 PRÍTOMNOSŤ SÍRY.....	26
1.4.17 OBSAH POLYCYKlickÝCH AROMATICKÝCH UHLĽOVODÍKOV.....	26
1.4.18 OBSAH POLYCHLÓROVANÝCH BIFENYLOV.....	26
1.4.19 PLYNOVANIE.....	26
1.4.20 ANALÝZA PLYNOV PLYNOVOU CHROMATOGRAFIOU.....	27
2 PRAKTICKÁ ČASŤ	28
2.1 POPIS PRACOVISKA	28
2.1.1 ZDROJ A OVLÁDACÍ PANEL.....	28
2.1.2 MERACÍ MOSTÍK PRE URČENIE STRATOVÉHO ČINITELA.....	29
2.1.3 MIKROSKOP NA SLEDOVANIE VZORKU.....	29
2.1.4 ZDROJ JEDNOSMERNÉHO NAPÄTIA A VOLTMETER.....	30

2.1.5 PRÍPRAVOK NA MERANIE ELEKTRICKEJ PEVNOSTI	32
2.1.6 PRÍPRAVOK PRE PRILOŽENIE ELEKTRICKÉHO POĽA NA VZORKU	33
2.1.7 MERANÝ OBJEKT	33
2.2 POSTUP PRÁCE	33
2.3 SCHÉMY ZAPOJENIA	34
2.4 ODMERANÉ HODNOTY A VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....	35
2.4.1 PRIERAZNÉ NAPÄTIE	35
2.4.2 STRATOVÝ ČINITEĽ	37
2.4.3 SKÚMANÁ VZORKA OLEJA	38
3 ZÁVER.....	41
POUŽITÁ LITERATÚRA	43

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1-1 Parafín - undekan [5]</i>	11
<i>Obr. 1-2 Naftén - cyklohexan [6]</i>	11
<i>Obr. 1-3 Arén - benzén [7]</i>	11
<i>Obr. 1-4 Methylsilikón - molekula silikónového oleja [9]</i>	12
<i>Obr. 1-5 Viskozita silikónového a minerálneho oleja [9]</i>	12
<i>Obr. 1-6 Sadza vzniknutá v oleji</i>	15
<i>Obr. 1-7 Farebné odtiene oleja podľa štandardu ISO 2049</i>	17
<i>Obr. 1-8 Pensky - Martensov prístroj [21]</i>	19
<i>Obr. 1-9 Okótovanie a uloženie elektród v prístroji na meranie el. pevnosti [16]</i>	23
<i>Obr. 1-10 Scheringov mostík [22]</i>	24
<i>Obr. 1-11 Vyjadrenie uhlu δ</i>	24
<i>Obr. 1-12 Pyknometer [23]</i>	25
<i>Obr. 1-13 Vplyv hĺbky rafinácie na absorpciu plynov a elektroizolačné vlastnosti oleja [16]</i>	26
<i>Obr. 2-1 Pracovisko pripravené na meranie stratového činiteľa</i>	28
<i>Obr. 2-2 Ovládací panel HAEFELY AC Control OT 248</i>	29
<i>Obr. 2-3 Merací mostík TETTEX 2840</i>	29
<i>Obr. 2-4 Mikroskop Levenhuk D870T</i>	30
<i>Obr. 2-5 Jednosmerný zdroj napätia</i>	31
<i>Obr. 2-6 VN voltmeter</i>	31
<i>Obr. 2-7 Elektródy prípravku na meranie elektrickej pevnosti</i>	32
<i>Obr. 2-8 Prípravok na meranie elektrickej pevnosti</i>	32
<i>Obr. 2-9 Prípravok na priloženie elektrického poľa na vzorku</i>	33
<i>Obr. 2-10 Priebeh napätia pri skúške elektrickej pevnosti</i>	34
<i>Obr. 2-11 Priebeh napätia pri určovaní stratového činiteľa</i>	34
<i>Obr. 2-12 Schéma zapojenia pre meranie elektrickej pevnosti</i>	34
<i>Obr. 2-13 Schéma zapojenia pre meranie stratového činiteľa</i>	35
<i>Obr. 2-14 Graf priebehu prierazného napätia pri skúške</i>	36
<i>Obr. 2-15 priebeh stratového činiteľa v závislosti na napätí</i>	37
<i>Obr. 2-16 Priebeh kapacity oleja v závislosti na napätí</i>	38
<i>Obr. 2-17 Vzorka minerálneho oleja s priblížením 4x</i>	38
<i>Obr. 2-18 Sadza v minerálnom oleji o veľkosti 125,96 x 170,88 μm priblíženie 10x</i>	39
<i>Obr. 2-19 Vzorka s priloženým napätím 1kV - katóda</i>	39

Obr. 2-20 Vzorka s priloženým napätím 1kV - anóda.....40

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 2-1 Podmienky prostredia pri experimente</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2-2 Odmerané hodnoty prieražného napätia</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2-3 Odmerané hodnoty stratového činiteľa a kapacity oleja</i>	<i>37</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

C	(m^2/s^2)	Konštanta viskozimetra
C_M	(F)	Kapacita prázdnej meracie nádoby
C_n	(F)	Normálová kapacita (119 pF)
C_0	(F)	Kapacita vzduchu v meracej nádobke
C_l	(F)	Kapacita skúšanej vzorky v meracej nádobke
$\check{C}k$	(mg KOH/g)	Číslo kyslosti
E_p	(V/m)	Elektrická pevnosť
g	(m^2/s)	Tiažové zrýchlenie (9,81 m^2/s),
I_C	(A)	Kapacitný prúd
I_G	(A)	Vodivostný prúd
N	(-)	Počet meraní
r	(m)	Polomer
R_v	(Ω)	Nameraná hodnota vnútorného elektrického odporu
s_l	(m)	Dráha
s_2	(kV)	Štandardná odchýlka
t	(s)	Stredná hodnota doby prietoku viskozimetrom
t_l	(s)	Čas za ktorý guľôčka prejde dráhu
$tg\delta$	(-)	Stratový činiteľ
$tg\delta_0$	(-)	Stratový činiteľ meracej nádoby so vzduchom
$tg\delta_l$	(-)	Stratový činiteľ meracej nádoby naplnenej skúšanou vzorkou izolačného oleja
\overline{U}_p	(kV)	Aritmetický priemer prierazov
U_{pi}	(kV)	Hodnota prierazového napätia pri jednotlivých prierazoch
v	(m/s)	Rýchlosť
$V_{v/o}$	(m^3)	Objem kvapky vytečenej do oleja
$V_{v/vz}$	(m^3)	Objem kvapky vytečenej do vzduchu
v_2	(%)	Variačný koeficient
ε_r	(-)	Relatívna permitivita
ε_v	(-)	Permitivita vákua ($8,8 \cdot 10^{-12}$)
η	(Pa.s)	Dynamická viskozita
σ	(S/m)	Konduktivita
ρ	(g/cm^3)	Hustota kvapaliny
ρ_g	(kg/m^3)	Hustota guľôčky
ρ_t	(kg/m^3)	Hustota oleja
ρ_v	(Ωm)	Vnútorná rezistivita
$\sigma_{v/o}$	(N/m)	Povrchové napätie voda – olej
$\sigma_{v/vz}$	(N/m)	Povrchové napätie voda – vzduch
ν	(m^2/s)	Kinematická viskozita
R_o		Obmedzovací odpor
C_m		Výbojové kondenzátory
Z_x		Meraný objekt – olej
Č.M.		Číslo merania

ÚVOD

Degradácia je dej, pri ktorom látky v tomto prípade kvapalinové izolanty strácajú svoje vlastnosti. K degradácii vedú rôzne činitele. Kvapalinové izolanty využívané v zariadeniach, ktoré pracujú s vysokým napätím, degradujú hlavne teplotou a dobou používania. Kvapalné izolanty sú kvapaliny, ktoré sa používajú v strojoch a prístrojoch pre ich vlastnosti ako sú: dobrá elektrická pevnosť, dobrá tepelná vodivosť a čo najdlhšia životnosť. Degradácia ovplyvňuje hlavné vlastnosti týchto látok a preto je nutné ich kontrolovať.

Teoretická časť tejto práce sa skladá zo štyroch podkapitol. Prvá je venovaná olejom minerálnym a olejom silikónovým, využívaným ako izolant a chladiivo v transformátore. Je tu opísané zloženie minerálnych olejov a silikónových olejov. Ďalšia podkapitola sa venuje jeho degradácii. Tá je spôsobená niekoľkými činiteľmi ako sú teplo, obsah kyslíka v atmosfére nádoby, cudzie látky obsiahnuté v oleji, kaly a vplyv elektrického poľa v respektíve prierazu izolantu. V nasledujúcej podkapitole sú opísané postupy pri odbere vzoriek z transformátora. Pre správne určenie degradácie oleja, je nutné olej správne odobrať. Existujú dva typy odberov oleja, a to odber bez kontaktu oleja s okolím a odber s kontaktom oleja s okolím. Tieto postupy pri odberoch je nutné dodržať, pretože inak hrozí znehodnotenie vzoriek a následná diagnostika by mohla mať skreslené výsledky. Ďalšia podkapitola sa venuje jeho diagnostike. Táto podkapitola teórie je aj zadaním bakalárskej práce. V tejto podkapitole sú opísané najpoužívanejšie skúšky oleja, vyplývajúce z noriem a zaužívaných postupov. Hneď pri odbere je možné zistiť stav oleja podľa zafarbenia a obsahu tuhých cudzích látok. Okrem klasických skúšok robených na oleji počas jeho používania, ako obsah vody, elektrická pevnosť, stratový činiteľ, sú tu aj skúšky, ktoré sa robia ešte pred použitím oleja ako napríklad hustota, oxidačná stabilita, vnútorná rezistivita, bod tuhnutia, bod vzplanutia a iné. Sú tu opísané aj menej zaužívané skúšky ako povrchové napätie, mikroskopické určenie veľkosti nečistôt a iné. Okrem klasických skúšok na ktoré je nutná vzorka oleja, existujú diagnostiky ktoré je možné robiť priamo v transformátore ako napríklad analýza plynovou chromatografiou.

Praktická časť tejto práce má štyri podkapitoly a je venovaná dvom skúškam a následnému sledovaniu oleja. Pre skúšky bol zostavený prípravok potrebný na priebeh skúšok. Skúšky, ktoré sa na transformátorovom minerálnom oleji s neznámymi vlastnosťami a neznámym stupňom degradácie robili, boli skúška elektrickej pevnosti a meranie stratového činiteľa v závislosti na napätí a zároveň meranie jeho kapacity. Vďaka týmto skúškam bolo možné odhadnúť stav oleja. Pri skúške elektrickej pevnosti bolo nutné vychádzať z predpísaných postupov. Výsledky skúšok boli zaznamenané do tabuliek a zakreslené do grafu. Hodnoty vypovedajúce o stave oleja zrátane a vyhodnotené. Ďalšia podkapitola praktickej časti sa venuje sledovaniu vzorky oleja. Zo vzorky oleja vystaveného skúškam boli odobraté dve vzorky na podložné sklá. V jednej odobratej vzorke sa sledovali cudzie látky obsiahnuté v oleji. Častice obsiahnuté vo vzorke oleja boli pozorované a zaznamenané. Druhé podložné sklo na ktoré sa odoberá vzorka oleja bolo upravené. Toto podložné sklo bolo upravené pre priloženie napätia na vzorku oleja. Toto napätie bolo jednosmerné a zdroj bol mäkký. To znamená, že vo vzorke dôjde pri trvalom vedení prúdu iba s nízkymi hodnotami v jednotkách mikroampérov a v prípade dotyku podložného skla nedôjde k ublíženiu na zdraví. Po priložení elektrického poľa na vzorku bolo sledované správanie sa oleja, pohyb cudzích látok v oleji. Pohyb látok bol zaznamenaný na videonahrávku.

V závere sú zhodnotené výsledky merania a pozorovania.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

Kvapalné izolanty sú látky v tekutom stave, s dobrými izolačnými vlastnosťami. Ich hlavnou výhodou je, že dokážu účinne odvádzať teplo od objektu bez toho, aby sa narušila elektrická pevnosť látky. Kvapaliny sú látky v tekutom stave. Tvoria prechod medzi tuhým a plynným stavom látky.

Kvapaliny nemajú štruktúru usporiadanú do mriežky ako u tuhých látok, ale štúdie pomocou röntgenu ukázali, že kvapaliny majú určité pravidelné zoskupenie, aj keď sa len združujú na malé priestorové tvary z niekoľkých molekúl. Tie sa na veľmi krátku dobu usporiadajú do kryštalických mriežok. Od plynov sa kvapaliny líšia tým, že kvapaliny zachovávajú svoj objem a okrem toho, plyny sú amorfné látky [1].

Reálne izolanty však obsahujú malé množstvo vodivých častíc (nečistoty) a z toho vyplýva, že každý reálny izolant dokáže viesť prúd, aj keď iba zanedbateľný.

Dielektrické charakteristiky ktoré určujú daný materiál sú:

- σ konduktivita (S/m),
- ε_r relatívna permitivita (-),
- $\operatorname{tg}\delta$ stratový činiteľ (-),
- E_p elektrická pevnosť (V/m) [2].

1.1 Transformátorový olej

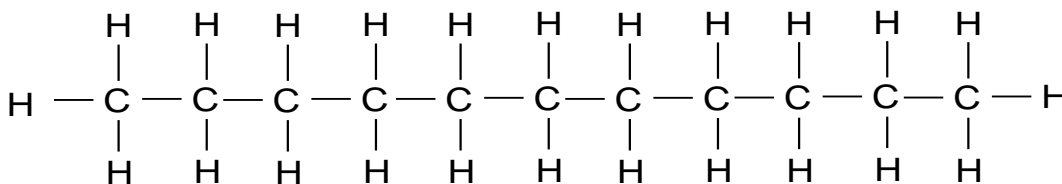
V transformátoroch sú používané hlavne minerálne oleje, alebo nová alternatíva silikónové oleje, ktorých hlavnými účelmi sú odoberanie tepla z vinutia transformátora a elektrická izolácia transformátora. Tieto oleje musia mať dostatočne nízku viskozitu, uľahčenie prenosu tepla kovenkciou, nízky bod tuhnutia, aby sa zabránilo tuhnutiu oleja pri nízkych teplotách. Ďalej vysokú odolnosť voči výboju, aby sa zabránilo nebezpečenstvu výbuchu a požiaru, nízku volatilitu v olejovej izolácii, aby sa zabránilo stratám oleja odparovaním, vysokú elektrickú pevnosť, odolnosť voči oxidácii a požiadavka na olej, aby sa dokázal premiešať s vodou len veľmi ťažko [3].

1.1.1 Minerálne oleje

Tento druh oleja sa získava z ropy. Jeho základ tvoria uhl'ovodíky. V rope je možné nájsť okrem uhl'ovodíkov aj síru, organické soli, dusík, zbytky kyslíku a mechanické nečistoty. Pre transformátorový olej je vhodný olej s najväčším obsahom parafínov, alebo nafténov, pretože tieto látky sú najstabilnejšie uhl'ovodíky z dôvodu, že sú nasýtené [4].

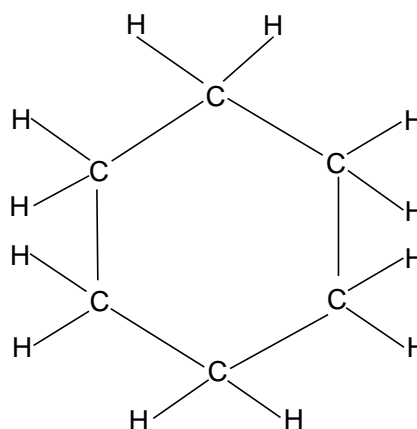
Existujú tri základné druhy uhl'ovodíkových molekúl:

Parafíny - v oleji majú najväčšie zastúpenie, pretože sú to najstabilnejšie uhl'ovodíky, patria do skupiny nasýtených uhl'ovodíkov. Nasýtené uhl'ovodíky obsahujú pevné väzby medzi jednotlivými prvkami. Parafíny sú známe aj pod názvom alkany, alebo lineárne alkany. Ich štruktúra nie je kolmá, ale kdeže v oleji sú parafíny v tekutom skupenstve, ich molekuly sa môžu natáčať, tzn. že väzby medzi uhlíkmi nie sú v rovine, ale tvoria „cik-cak“ štruktúru [5].



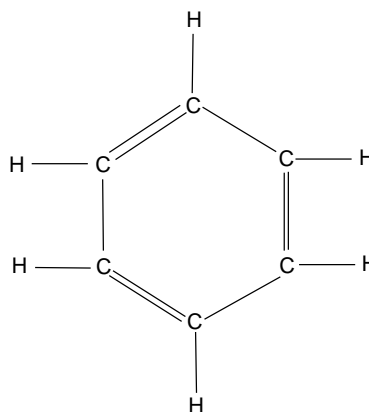
Obr. 1-1 Parafín - undekan [5]

Naftény - zlúčeniny s prstencovým usporiadaním uhlíkov. Tieto prstence obsahujú 6 na seba naviazaných atómov uhlíka, ale pri zlučovaní do väčších väzieb (viac prstencov) je nutné vedieť že, susedné prstence majú 2 spoločné atómy uhlíka, čiže naftalín, ktorý obsahuje 3 prstence nebude mať 18 uhlíkov, ale 14 atómov uhlíka. Naftény sú podobne ako parafíny nasýtené uhl'ovodíky, takže ich štruktúra je tiež stabilná. Okrem parafínyckých olejov sa rafinujú aj oleje naftenové. Ich vlastnosti sú rovnaké ako u olejov parafínyckých [4].



Obr. 1-2 Naftén - cyklohexan [6]

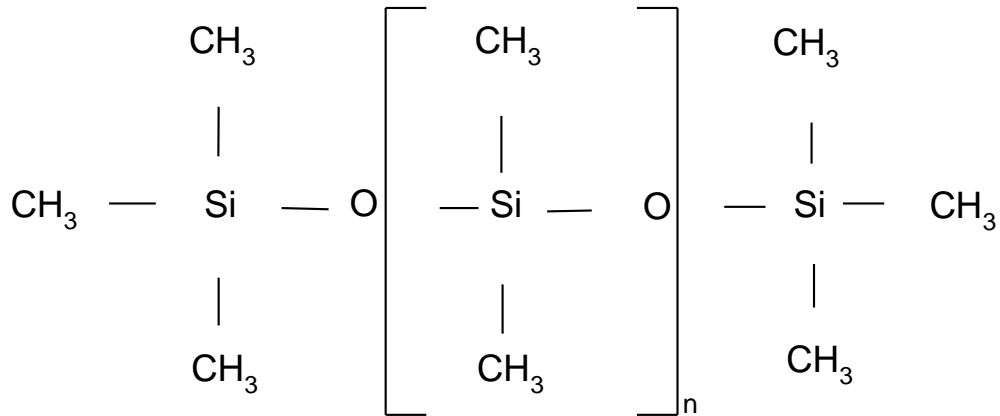
Aromatické uhl'ovodíky - známe aj ako aromáty, alebo arény, majú tiež 6-členné prstence, ale oproti naftalínom je tam na troch stranách dvojitá väzba medzi uhlíkmi. Tento fakt je dôležitý, pretože z toho vyplýva, že aromatické uhl'ovodíky sú nenasýtené a majú väčšiu reakčnosť. Tieto látky sa delia na monoaromatické a polyaromatické. Monoaromatický je napríklad benzén, ktorý je v podstate základný stavebný prvok pre arény, keďže je len z jedného prstenca a polyaromatické sú aromatické uhl'ovodíky s dvoma, alebo viacerými prstencami. Minerálne oleje pre rôzne využitia sa líšia obsahom aromatických uhl'ovodíkov, ale pre minerálne oleje využívané v transformátoroch musia mať čo najnižšie množstvo nenasýtených uhl'ovodíkov, kvôli stabilite oleja [4].



Obr. 1-3 Arén - benzén [7]

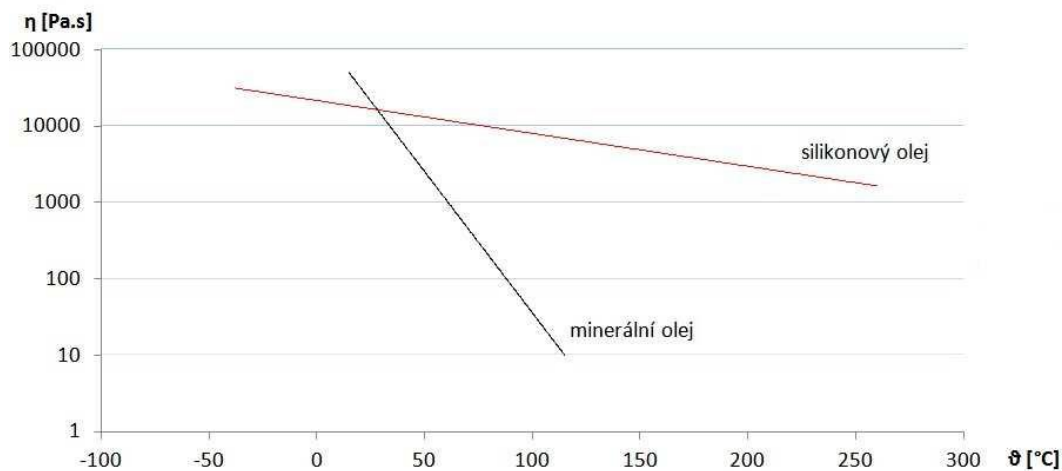
1.1.2 Silikónové oleje

Silikóny sú v podstate zlúčeniny kremíku, kyslíku a organických zlúčenín. Vďaka vysokej energii medzi väzbami Si-O a Si – organická zlúčenina (CH₃) majú silikóny vysokú tepelnú odolnosť v rozmedzí 60 až 200 °C a v krajných prípadoch do 350 °C. Tieto látky sú nepolárne, teda majú výborné izolačné vlastnosti. Silikónové oleje oproti minerálnym majú oveľa vyššiu cenu. Oleje sú bezfarebné a bez zápachu [8].



Obr. 1-4 Methylsilikón - molekula silikónového oleja [9]

Tieto oleje sú svojimi vlastnosťami veľmi podobné minerálnym olejom. Silikónové oleje sú ekologicky nezávadné, odolné voči vode - odpudzujú vodu a vyznačujú sa dobrou chemickou odolnosťou. Ich viskozita sa pri zmene teploty v porovnaní s minerálnymi olejmi mení len veľmi málo, čo ukazuje Obr. 1-5.



Obr. 1-5 Viskozita silikónového a minerálneho oleja [9]

Táto vlastnosť silikónového oleja nie je veľmi vhodná, pretože pri prehriatí transformátoru bude tečenie silikónového oleja pomalšie ako oleja minerálneho. Oproti minerálnym olejom majú vyššiu tepelnú stálosť a taktiež tuhnú pri nižších teplotách, ako minerálne oleje. Pri zvyšovaní teploty silikónového oleja nad 200 °C sa zvyšuje jeho oxidácia a z toho dôvodu aj jeho viskozita klesá pomalšie. Vo vákuu alebo uzavretej atmosfére môžu tieto teploty dosahovať krátkodobo až 300 °C. Bod tuhnutia bežných silikónových olejov sa pohybuje okolo -40 °C, ale existujú špeciálne typy olejov, ktoré majú bod tuhnutia až pri -100 °C. Tieto oleje sa tiež vyznačujú dobrými dielektrickými vlastnosťami, ktoré sa len málo menia s teplotou a frekvenciou [10].

1.2 Degradáčné procesy transformátorového oleja

Degradácia vzniká používaním oleja a jeho starnutím. Starnutie je jav, ktorý je závislý na čase a postupom času sa v oleji menia fyzikálno-chemické vlastnosti, elektrické vlastnosti a dochádza k strate izolačných vlastností a olej začína byť nebezpečný.

Vplyvy, ktoré spôsobujú starnutie oleja sú:

- vplyv kyslíka na olej za rôznych teplôt,
- vplyv rôznych energií na olej (magnetická, tepelná),
- vplyv chemických látok na olej,
- zaťaženie ktoré na olej vplývalo a rozloženie zaťaženia.

Bezpečnosť v prevádzke transformátora sa znižuje hlavne z týchto troch dôvodov:

- Zhoršenie chladenia, kvôli usadzovaniu kalov vzniknutých v oleji počas dlhoročnej prevádzky.
- Zhoršenie izolačných vlastností papierovej izolácie na vinutí, z dôvodu napadnutia kyselinami, ktoré vznikli rozpadovými procesmi v oleji.
- Vplyv zmenšenia elektrickej pevnosti oleja [11].

Starnutie oleja podľa príčiny je možné rozdeliť na:

- oxidačná degradácia,
- tepelná degradácia,
- degradácia vplyvom cudzích látok [11].

1.2.1 Oxidačná degradácia transformátorového oleja

Oxidácia je jav, pri ktorom sa na prvok, alebo molekulu naviaže kyslík a tým zmení jeho vlastnosti. Z tohto deja potom vznikajú rôzne zlúčeniny ako napríklad estery, alkoholy, ketóny, kyslíkaté kyseliny atď. Kyslík je veľmi reakčný prvok. Molekuly, ktoré vznikajú sú polárnejšie ako uhľovodíky, z ktorých vznikli a tieto molekuly sa v oleji rozpúšťajú. Tieto deje produkujú oxid uhličitý (CO_2) a reakčnú vodu. Látky vznikajúce pri starnutí zhoršujú elektrickú pevnosť oleja a taktiež kyseliny, ktoré vznikajú pri tomto procese napádajú kovové materiály, ktoré pod týmto vplyvom korodujú.

Makromolekulárne látky, ktoré vznikajú polykondenzáciou¹ a polymeráciou² primárnych kyslíkatých látok s reaktívnymi skupinami, sa v prvej fáze starnutia v oleji rozpúšťajú. Zvyšujú hustotu a viskozitu oleja, olej zmení farbu, je ďalej degradovaný a jeho elektrické vlastnosti sa stále zhoršujú. Pri pokračujúcich degradačných dejoch, polymerizácii a polykondenzácii v oleji začnú vznikať kaly, ktoré sú vlastne kyslíkaté nerozpustné makromolekuly. Olej je už z týchto dôvodov heterogénna sústava, ktorá pri pokračujúcich dejoch degradácie sa dostane k nevratnému poškodeniu izolácie olej - papier. Vplyvy kalov sú negatívne. Ako vedľajší produkt pri degradačných procesoch je reakčná voda [11].

¹ Polykondenzácia – dej, pri ktorom kyslíkaté kyseliny a hydroxidy reagujú a vytvárajú syntetické zlúčeniny a zvyšky po reakcii (voda)

² Polymerizácia – dej, pri ktorom sa z jednoduchších zlúčenín (monomérov) stáva zložitejšia reťazová štruktúra tzv. polymér.

1.2.2 Tepelná degradácia transformátorového oleja

Olej ako aj iné izolačné časti transformátora sú namáhané teplotou, ktorá vzniká od vodičov a jadra transformátora. Tepelná degradácia je vlastne rozpad oleja pôsobením tepla. Vzniká pri dlhšom používaní transformátora. Pri tomto type degradácie sa začnú rozpadávať molekuly oleja a môže dôjsť aj k odparovaniu plynov z transformátorového oleja. Tento dej má za následok čiastočné zionizovanie látky, čo znamená, že olej pomaly stráca svoje izolačné vlastnosti a taktiež dochádza k zníženiu objemu oleja v transformátore. Preto treba pri výbere materiálov dbať na ich vlastnosti. Silikónové a esterové oleje majú napríklad väčšiu odolnosť voči tepelnej degradácii ako minerálne oleje [11].

1.2.3 Degradácia vplyvom cudzích látok

Látky, ktoré degradujú olej z pohľadu pevných častíc (kalov), môžu byť časti papierovej izolácie, ktoré sa viažu na polárne uhl'ovodíky. Polárne uhl'ovodíky poznáme ako asfaltény, zoxidované aromatické uhl'ovodíky a mydlá z mastných kyselín.

Mastné kyseliny a iné kyslíkaté látky vznikajú oxidáciou uhl'ovodíkov, reakciou peroxidov s tvorenými radikálmi³, alebo katalytickým pôsobením kovov a vody na voľné radikály. Mydlá vznikajú pôsobením mastných kyselín, pevných častíc a vody.

Asfaltény vznikajú oxidáciou monoaromatických a polyaromatických uhl'ovodíkov. Spolu s aromatickou časťou ľahko viažu vodu. Pevné častice vznikajú chvením a starnutím pevných častí, hlavne celulózy.

Časti pokryté kalmi sa viac ohrievajú a tým dochádza k ďalším polymeračným reakciám. Kaly sú týmto pochodom premieňané na čiastočne polymerovaný gél, ktorý už nie je v oleji rozpustný ani pri vyššej teplote [11].

1.2.4 Účinky kalov

Okrem účinkov kalov, ako katalyzátorov starnutia oleja sa kaly v transformátore usádzajú na povrchu teplejších miest vinutí a na povrchu plechov. Upchávajú sa chladiace kanály medzi vinutím, tzn. že sa značne zhoršujú schopnosti odvádzania tepla z povrchu vinutia. Vďaka tomu ďalej vo zvýšenej miere vzrastá oteplenie vodičov, kaly na povrchu vinutia hustnú, až celkom zabránia prúdeniu oleja a odoberaniu tepla z povrchu vinutia do oleja. Tak dochádza k urýchlenému starnutiu papierovej izolácie vodičov (pri zvýšení teploty papiera o 8 °C sa jeho životnosť skraca o 50 %), až k jej zničeniu nasledovaného medzizávitovým skratom, alebo elektrickým preskokom.

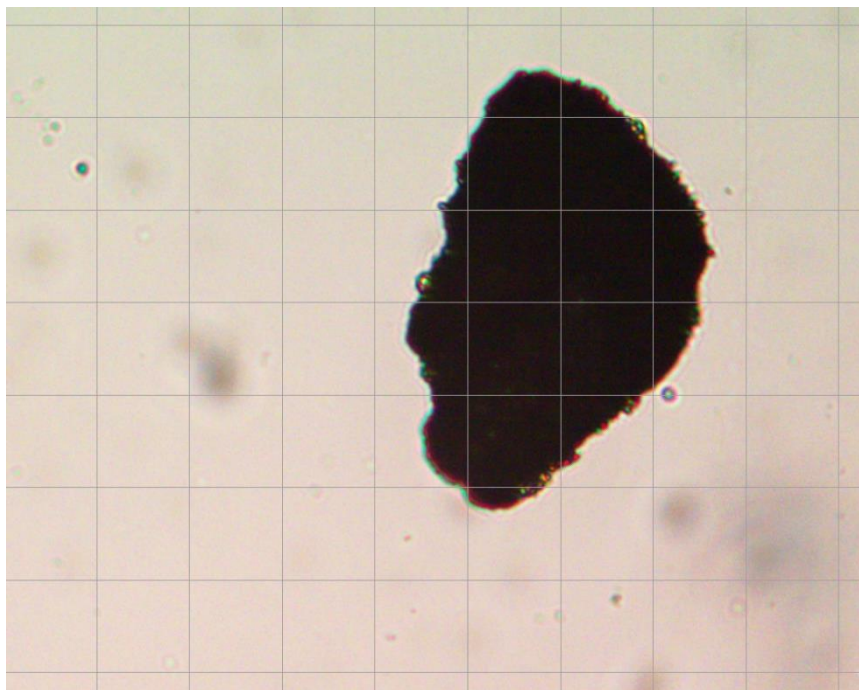
Kaly majú schopnosť v sebe udržiavať vlhkosť a to znamená, že môže dôjsť k zníženiu izolačného odporu medzi vinutiami a vznikne medzizávitový skrat, alebo preskok medzi živými časťami transformátora [11].

1.2.5 Degradácia vplyvom elektrických výbojov oleji

Minerálny olej - Určitý druh degradácie oleja je aj čiastočný elektrický výboj, alebo výboj na vinutí transformátora a v priechodkách transformátora. Pri prieraze sa rozpadávajú reťazce oleja a uvoľňujú sa plyny ako CO₂, CO, O₂, H₂O, CH₄, C₃H₈, a iné. Popri rozpade vzniká aj voda. Tuhé pozostatky po rozpade, tzv. sadze ostávajú rozptýlené v oleji. Obsah sadzí v oleji je limitovaný dobou prierazu. Čím dlhší prieraz v oleji, tým väčší obsah sadzí. Veľkosť sadze závisí na dĺžke

³ Radikál – atóm, molekula, ktorá obsahuje jeden alebo viac nespárovaných elektrónov

jedného neprerušovaného prierazu. Sadze vzniknuté v minerálnom oleji sú zložené z uhlíka, kyslíka, dusíka, vodíka a síry. Tieto látky tvoria fenoly, karboxyly, ketóny, chinóny a laktóny. Väčšina týchto látok sú nenasýtené uhľovodíky a zároveň s vyššou kyslosťou ako pôvodné reťazce uhľovodíkov. Tieto látky by vo veľkom množstve ovplyvňovali elektrickú pevnosť oleja, taktiež zhoršujú tepelnú vodivosť a vďaka tomu degradujú olej [12] [13].



Obr. 1-6 Sadza vzniknutá v oleji

Silikónový olej - Pri vzniku výboja v transformátore, ktorý je naplnený silikónovým olejom je nutné, aby sa v oleji nachádzali cudzie látky ako textil, papier, alebo nerezová oceľ, meď, mosadz a iné. Keďže sa v transformátore nachádza aspoň jedna z týchto látok, a pri skúšaní elektrickej pevnosti taktiež, vývoj rezíduí bude rovnaký. Pri elektrickom prieraze sa z vinutia transformátoru, alebo z elektródy pri skúške dostane do oleja izolácia vinutia, alebo molekula kovu z elektródy. Samotný výboj dodá oleju obrovské teplo a to naruší štruktúru oleja. V blízkosti počiatku výboja sa zo silikónovej štruktúry uvoľnia látky a na kremík sa naviaže cudzia látka z elektródy, alebo vinutia. Vznikajú tam tzv. silikónové kaučuky. Tieto kaučuky majú pevné skupenstvo a výrazne ovplyvňujú elektrickú pevnosť oleja. Vo väčšej vzdialenosti od vinutia vznikajú silikónové gély. Tieto gély sa tvoria oxidáciou, a siet'ovaním reťazcov oleja. V miestach postihnutých výbojom sa vďaka vplyvu týchto reťazcov a kaučukov zvyšuje viskozita a znižuje pevnosť. Obsah gélov a kaučukov v oleji závisí podobne ako vznik sadzí v minerálnom oleji, od doby trvania prierazu [14] [15]. V silikónovom oleji je možné tiež nájsť sadze, vzniknuté z organických zlúčenín naviazaných na kremíku. Pri prieraze ich vzniká omnoho viac ako gélov a kaučukov.

1.3 Odber vzoriek oleja

Pri odbere vzoriek z transformátora je nutné dbať na správny postup a následné zaistenie týchto vzoriek, aby počas dopravy do laboratória nedošlo k ich poškodeniu, alebo kontaminácii tzn., aby nedošlo k zvlhnutiu, odplyneniu, alebo práve k nasýteniu vzorky okolitými plynmi. V takom prípade hrozí, že zo vzoriek je možné určiť klamlivé fyzikálno – chemické vlastnosti a zle zhodnotiť stav.

Vzorky je možné odobrať dvomi spôsobmi:

1. Pri odbere a prevoze vzorka nebude v kontakte s okolitou atmosférou.
2. Pri odbere sa vzorka dostane do kontaktu s atmosférou [16].

Pri odbere bez kontaktu s okolím sa využívajú hadice odolné voči oleju, vďaka ktorým sa odoberá olej do 250 ml sklenenej nádoby bez ventilov. Na koncoch hadice sú uzatvárateľné, skrutkové, tlakové uzávery. Používa sa hadica s tromi koncami. Postup pri odoberaní je nasledovný. Najprv zo zdroja (transformátora) sa odpustia asi tri litre oleja, nasledovne sa pripojí jeden ventil hadice na vypúšťací ventil transformátora a jedným koncom hadice sa necháva odtekať olej preč. Na ďalšom konci je napojená vzorkovnica, ktorá má uzavretý ventil (je nad vypúšťacím ventilom transformátora). Tento koniec hadice je nutné stláčať, až kým si odoberateľ nie je istý, že je v ňom olej bez bubliniek. Keď sa tok z hadice zmení na stály, následne sa uzaviera voľný ventil hadice. Potom sa otvorí ventil do vzorkovnice. Odpustený objem z hadice má byť 3 až 5 násobok objemu vzorkovnice. Potom sa uzavrie ventil na vzorkovnici a nakoniec ventil na transformátore. Vo vzorke nesmie byť žiadna bublinka, inak treba celý odber opakovať. Odber je možné realizovať aj injekčnými striekačkami [16].

Odber, pri ktorom dochádza ku kontaktu s atmosférou nesmie byť uskutočnený za vlhkých podmienok tzn. dažďa, hmly, sneženia, alebo vysokej vlhkosti. Pri tomto odbere sa odoberá olej do litrovej fľaše. Fľaša by mala byť z hnedého, zatmaveného skla, s úzkym hrdlom a zabrusenou plnou zátkou.

Odber je realizovaný takto: najprv sa z transformátora odlejú približne dva litre oleja a následne sa použije oleju odolná hadička. Z tej musí začať prúdiť laminárny tok oleja a potom sa táto hadička zasunie až na dno fľaše. Následne sa nechávajú pretiecť približne dva litre oleja cez hrdlo fľaše a potom sa zľahka vytiahne hadica z fľaše. Uzavrie sa zátkou, ktorá je poliata olejom a necháva sa zvolna zapadnúť do hrdla. Potom sa uzáver dotiahne. V oleji by sa nemali nachádzať vzduchové bubliny. [16]

Prepravné fľaše a vzorkovnice musia byť čo najskôr prepravené do laboratória. Nesmú byť vystavené priamemu slnečnému žiareniu, ani prudkým zmenám teploty. Vzorky je nutné označiť a napísať z akého zdroja boli odoberané a taktiež či už bol daný olej upravovaný. Skúšky je nutné urobiť čo najskôr, štandardne do piatich dní po odbere a v prípade detekcie vody maximálne do troch dní. Pri vzorkách, ktoré idú na obsah vody, je ideálne odberať vzorky zo stroja, ktorý je v prevádzke už dlhšiu dobu kvôli tomu, aby sa detekovala aj voda, ktorá je viazaná v pevnej izolácii. V prípade teplého oleja v stroji sa voda z pevnej izolácie dostáva a je možné ju detekovať v oleji [16].

1.4 Diagnostika oleja

V každom elektrickom stroji, ktorý používa olej, je nutné tento olej kontrolovať. Jeho vlastnosti sa menia, ako je už uvedené v časti degradačné procesy oleja. Preto je nutné pre tento olej použiť celú škálu diagnostických programov, pri ktorých sa určuje a posudzuje každá vlastnosť oleja. Kvalita oleja sa určuje podľa parametrov uvedených v normách, ktoré určujú či je olej použiteľný. V prípade, že olej nespĺňa jednu vlastnosť, tak je automaticky nepoužiteľný pre dané zariadenie a musí byť odstránený zo zariadenia a vymenený za nový, alebo regenerovaný olej. Ak je stroj prevádzkovaný pravidelne, musí byť jeho olej kontrolovaný stále. Frekvencia kontrol závisí na napäťovej hladine, na výkone, alebo na prevádzkových podmienkach.

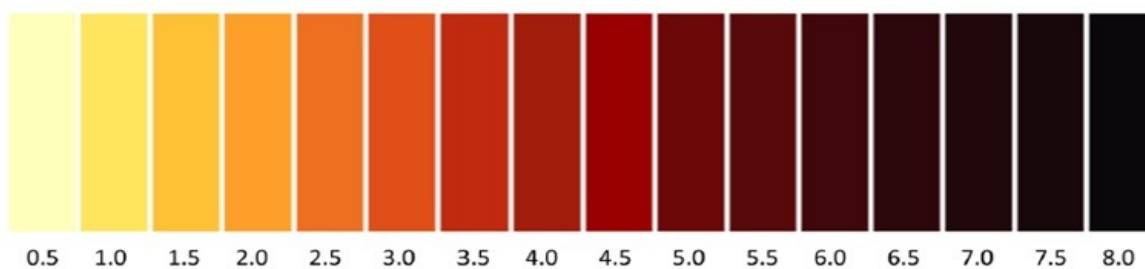
1.4.1 Farba a vzhľad oleja

Farba oleja nie je kritickou vlastnosťou, ale jej určenie môže byť ukazovateľom degradácie, kontaminácie a iných vlastností. Táto skúška sa vyjadruje v číselných hodnotách, prípadne čísla a písmena rady farebných štandardov. Okrem farby sa môže zistiť prítomnosť kalov v oleji, voľnej vody, vlákien, nečistôt a ďalších cudzích látok. Taktiež podľa sfarbenia oleja je možné určiť stupeň oxidácie. Rýchlo rastúce, alebo vysoké číslo farby môže byť vykázané degradáciou, alebo kontamináciou oleja. Väčšinou je to možné určiť hneď pri odbere [16] [17].

Pre posúdenie vzhľadom sa používajú dva rôzne postupy:

- **Subjektívny** - porovnávanie farby oleja s farebnými etalónmi je nutné porovnávať vždy v rovnakých hrúbkach vrstvy. Ideálne je to porovnávať pri nepriamom dennom svetle.
- **Objektívny** - určenie pomocou prístroja, ktorý dokáže určiť sfarbenie oleja aj odtieň. Prístroj v podstate porovnáva farbu kvapaliny a farbu skiel, ktorými je možné dostať požadovaný odtieň [16].

Norma ČSN EN 60296 udáva vzhľad oleju ako číry, bez sedimentov a suspendovaných látok a norma ČSN EN 60422 farbu do maximálne 2.0 [17] [18].



Obr. 1-7 Farebné odtiene oleja podľa štandardu ISO 2049

1.4.2 Viskozita

Viskozita je fyzikálna veličina udávajúca pomer medzi šmykovým napätím a zmenou rýchlosti v závislosti na vzdialenosti a medzi susednými vrstvami pri prúdení skutočnej kvapaliny. Viskozita závisí na príťažlivých silách vnútorných častíc. Oleje s väčšou viskozitou majú väčšie príťažlivé sily, čo znamená, že olej má horšiu tekutosť a brzdí sa pohyb kvapaliny. Pri zvýšenej viskozite je namáhanie oleja vyššie, čo vedie ku jeho degradácii. Samotná viskozita sa nezvyšuje s degradáciou iba v extrémnych prípadoch, ako napríklad pri výbojoch a oxidácii [17] [18].

Dynamická viskozita η

Táto viskozita určuje odpor molekúl voči posunutiu pri tečení. Meria sa pri prietoku oleja napríklad cez rúrky. Jej základná veličina Pa·s. Fyzikálne je to pomer strihového napätia a rýchlosti šmyku kvapaliny [19].

Výpočet

$$\eta = v \cdot \rho \cdot 10^3 \quad (1.1)$$

kde: η dynamická viskozita (Pa.s),
 v kinematická viskozita (m²/s),
 ρ hustota kvapaliny (g/cm³) [16].

Kinematická viskozita

Je definovaná ako odolnosť tekutiny voči tečeniu, pôsobením gravitácie. Určuje sa meraním času, za ktorý dané množstvo oleja pretečie presne určeným kapilárnym otvorom za pomoci gravitácie (olej tečie vertikálne). Dá sa vypočítať aj úpravou vzorca 1.1. Jej základnou jednotkou je m²/s. Kinematická viskozita stúpa s molekulovou hmotnosťou a bodom varu, čo má aj praktický význam. Keďže olej slúži ako chladiace médium, tak pri nižšej viskozite má lepší chladiaci účinok [16] [19].

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.2)$$

$$v = C \cdot t \quad (1.3)$$

Kde: C konštanta viskozimetra (m²/s²),
 t stredná hodnota doby prietoku viskozimetrom (s) [16].

Druhy viskozimetrov.

1. **Kapilárne viskozimetre** - sú to väčšinou digitálne prístroje, ktoré merajú stratu tlaku v kapiláre pri známej teplote a známych tlakoch na oboch koncoch kapiláry.
2. **Stokesove viskozimetre** - opiera sa o pád telieska do valcovej nádoby naplnenej olejom. Pád telieska (gulôčky) bude brzdiť viskozita oleja a na základe tohto merania sa dá určiť. Gulôčka padá po dráhe 100 mm a meria sa čas jej pádu. Pre určenie rýchlosti gulôčky sa používa klasický vzorec pre rýchlosť a následne vzorec pre výpočet viskozity.

$$v_1 = \frac{s_1}{t} \quad (1.4)$$

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g \cdot (\rho_g - \rho_t)}{v_1} \quad (1.5)$$

kde: v_1 rýchlosť gulôčky (m/s),
 s_1 dráha (100 mm) (m),
 t_1 čas za ktorý gulôčka prejde dráhu (s),
 r polomer gulôčky (m),
 g tiažové zrýchlenie (9,81) (m²/s),
 ρ_g hustota gulôčky (kg/m³),
 ρ_t hustota oleja (kg/m³).

3. **Rotačné viskozimetre** - sú to prístroje zložené väčšinou z motora a jednej turbíny, ktorá je ponorená do kvapaliny. Vychádza sa zo znalosti, že v oleji pôsobia sily proti pohybu. Meranie prebieha tak, že sa meria záberový moment motora teda sila, ktorá je potrebná k prekonaniu odporu molekúl oleja. Tieto výpočty sú robené digitálne, kde záleží aj na geometrii turbíny a na záberovom momente na prázdno.
4. **Vibračné viskozimetre** - sú to viskozimetre, ktoré merajú viskozitu na základe rezonancie. Pri frekvencii 30 Hz sa na doštičkách sníma elektrický prúd nutný k rezonancii [16].

Norma udáva hodnoty viskozity pre transformátorový olej pri 40 °C maximálne 12 mm²/s a pri teplote -30 °C maximálne 1800 mm²/s [18].

1.4.3 Bod vzplanutia

Táto hodnota ukazuje hodnotu teploty, pri ktorej sa v oleji vytvára určité množstvo par. Tieto pary pri priblížení ohňa (iskry), vzplanú a okamžite zhasnú. Bod horenia je za bodom vzplanutia, teda je to teplota, pri ktorej sa vytvorí dostatočné množstvo par na horenie. Tieto teploty sa určujú hlavne z hľadiska bezpečnosti oleja. Pary sú väčšinou zložené z uhl'ovodíkov o nízkej molekulovej hmotnosti, ktoré pri kontakte s kyslíkom a pri preskoku iskry, začnú horieť [20].

Pri určovaní bodu vzplanutia sa používa olej, ktorý neobsahuje vodu. Olej sa naleje do plynkej misky s uzáverom, ktorá sa následne ohrieva. Pri oleji je malý plamienok, ktorý potom pary zapáli. Pri vzplanutí par sa na hladine oleja sa objaví malý plameň, sprevádzaný malou explóziou. Keď tento dej skončí, je nutné okamžite odmerať teplotu. Táto teplota sa označuje ako bod vzplanutia. V praxi sa používa Pensky - Martensov prístroj [16].

Norma udáva minimálny bod vzplanutia 135 °C [18].



Obr. 1-8 Pensky - Martensov prístroj [21]

1.4.4 Bod tuhnutia

Táto teplota je dôležitým parametrom oleja. Týka sa hlavne olejov používaných v extrémne nízkych teplotách. Olej pri ochladzovaní začína vytvárať pevné kríštálie, stúpa viskozita a ubúda kvapalnú skupenstvo oleja.

Skúška prebieha nasledovne. Najprv sa po dobu 15 minút zahrieva vzorka oleja na teplotu 50 °C. Potom olej sa naleje do skúmavky, do ktorej sa vloží teplomer. Olej sa ochladzuje na teplotu 30 °C (najzaužívanejší postup ochladzovania je vloženie skúmavky do Dewarovej nádoby kde sa ochladzuje tuhým CO₂). Potom sa skontroluje, či je olej tekutý naklonením skúmavky. Tento postup sa opakuje pri poklese teploty o 2 °C. V prípade, ak sa olej v skúmavke 5 sekúnd nepohne, tak odmeraná teplota je označená ako bod tuhnutia [16].

Norma udáva hranicu tekutosti -40 °C [18].

1.4.5 Obsah vody v oleji

Nízky obsah vody v oleji je požadovaný, kvôli žiadaným dielektrickým vlastnostiam oleja a nízkemu stratovému činiteľovi. Obsah vody v oleji závisí na type oleja, jeho teplote a stave. V oleji sa voda delí na vodu emulgovanú, rozpustnú a voľnú. Voľná voda sa z pravidla nezisťuje [17].

Obsah vody sa dá určiť dvomi spôsobmi podľa štandardu IEC 60814:

1. **Coulometrická titračná metóda** - je to metóda, pri ktorej voda reaguje s jódom, oxidom siričitým, alkoholom v organickom rozpúšťadle a organickou bázou. Prv je potrebné zistiť, či sa vo vzorke nenachádzajú nečistoty a bublinky vody. V prípade ak áno, je potrebné vzorku prefiltrovať. Ak nie, tak je možné pokračovať v skúške. Najprv sa zmieša vzorka s alkoholom obsahujúcim jódové ióny a s oxidom siričitým. Následne voda obsiahnutá v oleji sa začne rozkladať elektrolýzou. Začnú sa vytvárať náboje, vďaka ktorým je možné určiť obsah vody. Prevod je definovaný ako: 1 mg vody tvorí približne 0,72 C.
2. **Ďalšia metóda sa zakladá na reakcii hydridu vápnika s vodou**, pri ktorej vzniká vodík, ktorého množstvo je úmerné množstvu vody v oleji [16].

Obsah vody v oleji podľa normy je maximálne 30-40 mg/kg [18].

1.4.6 Usadeniny a rozpustné kaly

Stanovenie obsahu usadenín a rozpustných kalov sa robí vizuálnou kontrolou. Olej sa premieša s n-heptánom⁴. Potom sa olej nechá odstáť 24 hodín v tme. Ostatné napr. organické látky a asfalty tvoria nerozpustnú zložku po zmiešaní oleja s n-heptánom [17].

Maximálna dovolená hodnota obsahu kalov v oleji, ktorý sa používa je 0,8 % [18].

1.4.7 Mikroskopické určenie veľkosti a počtu častíc nečistôt

Po rafinácii oleja, sa s olejom ešte manipuluje a tým sa zvyšuje obsah nečistôt v ňom. Preto sa je nutné olej prefiltrovať a až následne požiť. Frituje sa cez sústavu filtrov.

Na určenie veľkosti a počtu nečistôt sa používa mikroskop. Mikroskopom sa pozorujú mikropóry filtrov s veľkosťou 0,8 až 5 μm. Samotná mierka priblíženia je od 5 až do 100 μm. Sleduje sa mriežka veľkosti 3,1 x 3,1 mm a stanovuje sa počet častíc v 100 cm³. Pri vyhodnocovaní sa do dokumentácie môžu pridať aj fotografie filtra a nečistôt pod mikroskopom. Moderné metódy čítačov už umožňujú určiť počet nečistôt v 1 ml oleja, ktoré vyrátajú v závislosti na veľkosti nečistôt [16].

⁴ N-heptán - uhľovodík zo skupiny alkínov so základným chemickým vzorcom C₇H₁₆

1.4.8 Číslo kyslosti

Prítomnosť kyslých látok v oleji zhoršuje jeho vlastnosti a napáda okolie oleja (nádobu, pevnú izoláciu, plechy). Kyslé latky v oleji indikujú aj stupeň jeho degradácie. Kyslosť oleja sa určuje v mg KOH/g. Táto jednotka určuje množstvo hydroxidu draselného, potrebného na anulovanie kyslosti v grame oleja [17].

Stanovenie kyslosti pH titrátorom - sa realizuje na elektronickom automatickom pH titrátoře⁵ s kombinovanou elektródou pre bezvodé prostredie.

Stanovenie čísla kyslosti na alkalickú modrú 6B - zakladá sa na titracii⁶ kyslých zlúčenín v oleji s alkoholickým roztokom KOH. Metóda zahŕňa aj matematické výpočty, čiže jej chyba spočíva v zaokrúhľovaní. Táto metóda sa realizuje počítačom a elektronickým porovnávaním farieb [16].

Normou určené číslo kyslosti je maximálne 0,01 mg KOH/g pre nepoužité oleje a pre oleje v prevádzke 1,2 mg KOH/g [18].

1.4.9 Medzipovrchové napätie

Je to sila, ktorá pôsobí kolmo na jednotku dĺžky povrchu. Jej hodnota sa udáva v mN/m. Povrchové napätie je ukazovateľom starnutia oleja. Pri starnutí vznikajú v oleji organické látky, ktoré sú polárne a zdržujú sa na rozhraní olej - voda. Pri prekročení kritickej hladiny začnú látky vytvárať na hladine súvislú vrstvu. Pre meranie sa využívajú dva postupy podľa ISO 6295:

1. Prvý spôsob je **meranie sily potrebnej na odtrhnutie platinového krúžku z povrchu**, alebo sklenenej doštičky. Meranie je možné uskutočniť na rozhraniach vzduch - olej, alebo olej - voda.
2. **Kvapková metóda** - pri tejto metóde sa meria objem (hmotnosť) vody, vytečenej do oleja a vytečenej do vzduchu z kapiláry. Olej a voda musia mať rovnakú teplotu. Najprv sa odleje olej do skúmavky približne 100 ml a následne sa ponorí do neho kapilára cca 1 cm pod jeho hladinu. Potom sa odmeria objem minimálne desiatich kvapiek vytečených do oleja. Meranie kvôli presnosti je nutné opakovať minimálne 2-krát. Následne odmerané hodnoty sa priemerujú a dosadia do vzorca pre výpočet povrchového napätia [16].

$$\sigma_{v/o} = V_{v/o} \cdot (\rho_v - \rho_o) \frac{\sigma_{v/vz}}{\rho_v V_{v/vz}} \quad (1.6)$$

- kde:
- $\sigma_{v/o}$ povrchové napätie na rozhraní voda – olej (N/m),
 - $V_{v/o}$ objem kvapky vytečenej do oleja (m³),
 - ρ_v hustota vody (kg/m³),
 - ρ_o hustota oleja (kg/m³),
 - $\sigma_{v/vz}$ povrchové napätie na rozhraní voda – vzduch (N/m),
 - $V_{v/vz}$ objem kvapky vytečenej do vzduchu (m³) [16].

Doporučuje sa minimálna limitná hodnota 35 mN/m [17].

⁵ pH titrátor – prístroj, ktorým sa meria kyslosť. Princíp spočíva v určovaní množstva reaktantu pridávaného do skúmanej vzorky

⁶ Titracia – odmeranie neznámeho koncentráta v obsahu meranej látky, tak aby po pridaní činidla, koncentrát a činidlo zreagovali bezo zvyšku

1.4.10 Oxidačná stabilita

Tento parameter sa určuje pri čerstvo rafinovanom oleji a určuje dobu, pri ktorej olej zoxiduje. Tento parameter určujú stratový činiteľ, medzipovrchové napätie, farba oleja a číslo kyslosti. Táto skúška prebieha pri zvýšených degradačných činiteľoch tzn. zvýšená teplota, zvýšený obsah kyslíka v nádobe s olejom a prítomnosť medi a železa v oleji. Niekedy sa pri skúške prikladá aj elektrické pole. Trvanie skúšky je 164 hodín pre olej neinhibovaný, pre stopovo inhibovaný je 332 hodín a pre olej inhibovaný je doba trvania skúšky 500 hodín [16].

1.4.11 Obsah inhibítora

Vlastnosti oleja a spoľahlivosť prevádzky je do značnej miery závislá na odolnosti oleja voči oxidácii. Pre spomalenie starnutia oleja sa do oleja pridáva inhibítor. Podľa obsahu inhibítora je možné rozdeliť oleje na **neinhibovaný**, **stopovo inhibovaný**, **inhibovaný**.

Táto skúška sa robí pri novom oleji, najbežnejšie sa v oleji nachádza 0,3 % inhibítora. Inhibítory sú veľmi často na báze fenolov a amínov [16].

Podľa IEC 60666 sa delia na:

- metódu infračervenej spektroskopie (IC),
- chromatografickou metódou na tenkej vrstve,
- kolorimetrickou metódou.

Najpoužívanejšia metóda je metóda IC, pri ktorej sa porovnáva optická hustota absorpčného pásu neznámej látky, s kalibračnou krivkou. Infračervená spektroskopia patrí medzi analýzy, ktoré sa zaoberajú vlastnosťami spektier a sú založené na interakcii elektromagnetických žiarení a vzorky. Infračervené žiarenie prechádza vzorkou a je absorbované jej molekulami a následne premenené na energiu, ktorá zapríčiňuje vibrácie molekúl. Kalibračná krivka sa získa z piatich zmesí s obsahom inhibítora 0,2 - 0,5 % obsahu [16].

U stopovo inhibovaného oleja je obsah 0,08 %, u inhibovaného oleja je 0,08 až 0,40 % [18].

1.4.12 Elektrická pevnosť

Táto skúška patrí medzi najčastejšie. Elektrická pevnosť oleja ukazuje stupeň jeho degradácie (voda, nečistoty). Elektrická pevnosť sa určuje z pomeru výšky prierazného napätia a vzdialenosti elektród. Pierazné napätie je napätie, pri ktorom v oleji nastane prvý výboj. Pre presnú hodnotu napätia sa meranie opakuje a následne sa robí aritmetický priemer z meraní. Pred meraním je nutné skontrolovať, či na elektródach nie je nános po minulej skúške. Nádoba na olej musí byť dokonale čistá. Po naliatí oleja do nádoby, sa začína až sa z oleja dostanú vzduchové bubliny, ale najneskôr do dvoch minút. Po každom prieraze sa olej nechá trochu odstáť (maximálne 2 minúty), počká sa kým sa z neho dostanú vzniknuté bubliny a je nutné z neho dostať všetky nečistoty, ktoré vznikli pri výboji a premiešať ho. Tento postup sa opakuje po každej skúške. Pri skúšaní sa robí šesť prierazov oleja [16].

Nádoba na olej by mala byť zo skla, alebo z porcelánu o objeme 300 až 600 ml. Leštené elektródy môžu byť z medi, mosadze, alebo nerezovej oceli. Elektródy majú mať tvar polgulí. Štandardná veľkosť medzery medzi polgulami je 2,5mm. Zvyšovanie napätia musí byť lineárne so stúpaním 2 kV/s. Kmitočet napätia má byť v rozmedzí od 45 do 62 Hz. Teplota okolia je v rozmedzí od 15 do 25 °C a olej sa má líšiť teplotou maximálne o ± 5 °C od okolia. Samotná dĺžka prierazu v minerálnom oleji má byť do 10 ms a v silikónovom do 1 ms [17].

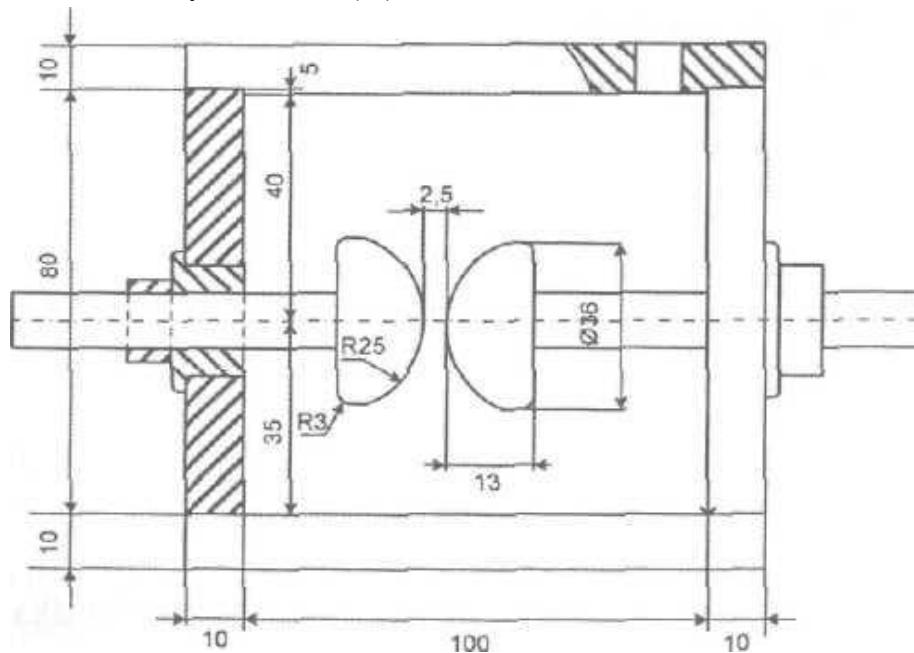
Prierazné napätie podľa normy je 30 kV a po laboratórnej úprave oleja 70 kV [18].

$$\overline{U}_p = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \quad (1.7)$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{U}_p - U_{pi})^2}{n - 1}} \quad (1.8)$$

$$v_2 = \frac{s_2}{\overline{U}_p} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

- kde: \overline{U}_p aritmetický priemer prierezov (kV),
 n počet meraní (-),
 U_{pi} hodnota prierezového napätia pri jednotlivých prierezoch (kV),
 s_2 štandardná odchýlka (kV),
 v_2 variačný koeficient (%) [16].

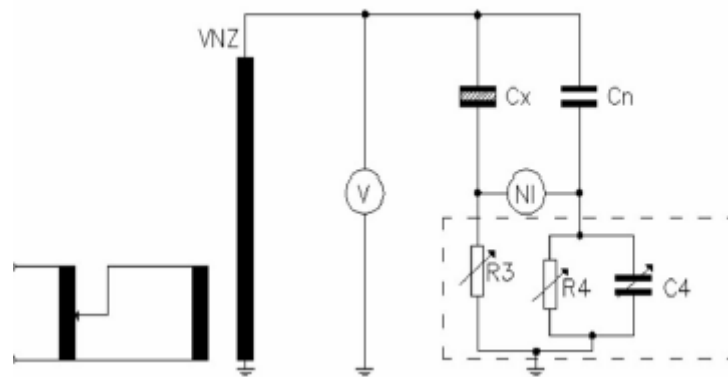


Obr. 1-9 Okótovanie a uloženie elektród v prístroji na meranie el. pevnosti [16]

Hodnota variačného koeficientu nesmie presiahnuť 20 %. V prípade ak presiahne, vezme sa ešte jedna vzorka z danej várky. Ak aj táto má vyššiu hodnotu variačného koeficientu ako je 20 %, olej sa považuje za nevyhovujúci [17].

1.4.13 Stratový činiteľ a relatívna permitivita

Straty v nových olejoch, ktoré sú bez prímiesí a nečistôt, sú určené iba dielektrickou vodivosťou. Keďže je vodivosť malá, je aj malý stratový činiteľ. V zostarnutých olejoch je už vyššie množstvo nečistôt a vyšší stratový činiteľ. Pri zvyšujúcej sa teplote, stúpa stratový činiteľ a pri zvyšujúcej frekvencii klesá. V zostarnutých olejoch majú rovnakú priebeh charakteristiky, ale okrem tej sa tam objavuje lokálne maximum vplyvom polarizačných látok vytvorených v oleji. Na meranie stratového činiteľa sa využíva Scheringov mostík, alebo automatický mostík. Vzorka je umiestnená do obvodu mostíka a mostík je vyvážený tak, aby diagonálne cez neho nepreteká prúd [16].

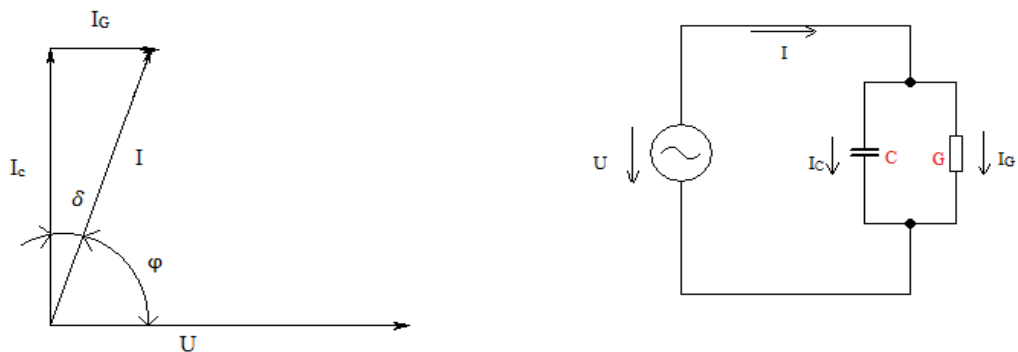


Obr. 1-10 Scheringov mostík [22]

kde: C_x meraný objekt,
 C_n kapacitný normál,
 NI nulový indikátor.

Relatívna permitivita je faktor, ktorý hovorí o čistote oleja. Na meranie relatívnej permitivity je tiež možné použiť mostík [16].

Výpočty pre stratový činiteľ a relatívnu permitivitu sú nasledovné:

Obr. 1-11 Vyjadrenie uhlu δ

kde: I_C kapacitný prúd (A),
 I_G vodivostný prúd (A),
 I celkový prúd(A).

Ak je $tg\delta$ menší ako 0,1

$$tg\delta = tg\delta_1 - \frac{C_0}{C_1} \cdot tg\delta_0 \quad (1.10)$$

$$\epsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \quad (1.11)$$

Ak je $tg\delta$ väčší ako 0,1

$$tg\delta = tg\delta_1 \quad (1.12)$$

$$\epsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \cdot (1 + tg^2\delta_1) \quad (1.13)$$

kde: C_0 kapacita vzduchu v meracej nádobke (F),
 $tg\delta_0$ stratový činiteľ meracej nádobky so vzduchom (-),
 C_1 kapacita skúšanej vzorky v meracej nádobke (F),
 $tg\delta_1$ stratový činiteľ meracej nádobky naplnené skúšanou vzorkou oleja (-) [22].

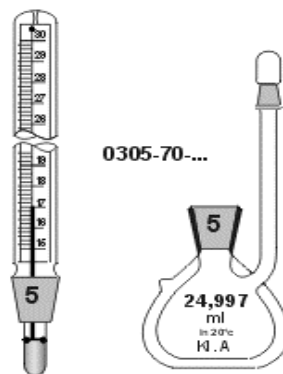
Maximálna dovolená hodnota stratového činiteľa pri 90 °C je 0,015 [17].

1.4.14 Hustota

Táto diagnostika patrí k menej významným diagnostikám, pretože hustota oleja neurčuje jeho starnutie a stupeň degradácie. Hustota slúži skôr na zatriedenie ropných produktov. Tento typ skúšky sa môže určovať v olejoch, ktoré sú používané v extrémnych atmosférických podmienkach.

Najčastejšie stanovenie hustoty je hustomerom. Táto metóda vychádza z Archimedovho zákona. Teleso (hustomer) je ponorené do kvapaliny (oleja) a meria sa hĺbka jeho ponoru. Je nutné, aby olej aj hustomer mali rovnakú teplotu a aby sa vrch hustomeru nenamočil. Po ustálení sa odčíta hodnota z hustomeru v g/cm^3 . Je nutné vedieť teplotu, pri ktorej meranie prebehlo. Ako hustomer sa využíva sklenený pyknometer [17].

Maximálna hodnota hustoty podľa normy je 0,895 g/ml pri 20 °C. [17]



Obr. 1-12 Pyknometer [23]

1.4.15 Vnútna rezistivita

Vnútna rezistivita oleja je odpor samotného oleja a určuje sa ako jeho prevrátená hodnota, čiže vodivosť. Na náhradnej schéme Obr. 1-11 je znázornená ako vodivosť G. Táto vodivosť sa zvyšuje s degradáciou oleja, pohybom iónov, zvýšením teploty oleja. Takisto ju zvyšuje voda, ktorá pri zníženej teplote začne zrážať [17].

Meranie vnútornej rezistivity vychádza z ohmovho zákona. Meracia nádoba musí byť ku zdroju pripojená tak, aby kladná elektróda bola z vonkajšej strany. Vzorka sa pripojí na jednosmerné elektrické pole zadané výrobcom oleja. V prípade, ak nie je udaná hodnota elektrického poľa, používa sa pole o intenzite 0,25 MV/m. Prúd sa miera pikoampérometrom. Doba elektrizácie vzorky je udaná výrobcom oleja a v prípade ak nie je, vzorka sa necháva elektrizovať minútu a následne sa odráta veľkosť odporu. Meranie sa odporúča urobiť 2-krát a rozdiel medzi hodnotami nesmie byť väčší ako 35 %. V opačnom prípade sa meranie opakuje [16].

Vnútna rezistivita sa určí zo vzorca:

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} C_M R_v \quad (1.14)$$

- kde:
- C_M kapacita prázdnej meracie nádoby (F),
 - R_v nameraná hodnota vnútorného elektrického odporu (Ω),
 - ρ_v vnútna rezistivita (Ωm),
 - ε_v permitivita vákua $8,8 \cdot 10^{-12}$ (F/m) [16].

Minimálna hodnota rezistivity pri 90 °C je 60 G Ωm [17].

1.4.16 Prítomnosť síry

Obsah síry v oleji závisí na rope, z ktorej je olej a na type rafinácie. Pri rafinácii sa upravuje obsah síry, ale vždy tam môže ostať určité množstvo. Preto je dobre vedieť, aký obsah síry je v objeme a hlavne obsah korozívnej síry. Korozívna síra je nežiadúca, pretože poškodzuje kovové povrchy [17].

Pre určenie väčšieho množstva síry je vhodné použiť metódu oxidácie síry - spaľovanie síry s oxidačnými činidlami. Pre určenie menšieho množstva, v radoch ppm, sa určuje pomocou röntgenovej fluorescenčnej spektrometrie (XRF) [16].

Pre síru nie je špecifická hodnota [17].

1.4.17 Obsah polycyklických aromatických uhl'ovodíkov

Tieto látky sú definované ako karcinogény a preto je nutné, aby ich hodnota v oleji bola upravená na určitú úroveň. PCA sa dá detekovať pomocou extrakcie dimetylsulfoxidu (DMSO) a stanovovať vysoko účinnou kvapalinovou chromatografiou s fluorescenčnou detekciou [16].

Maximálny obsah PCA v oleji sú 3 % [18].

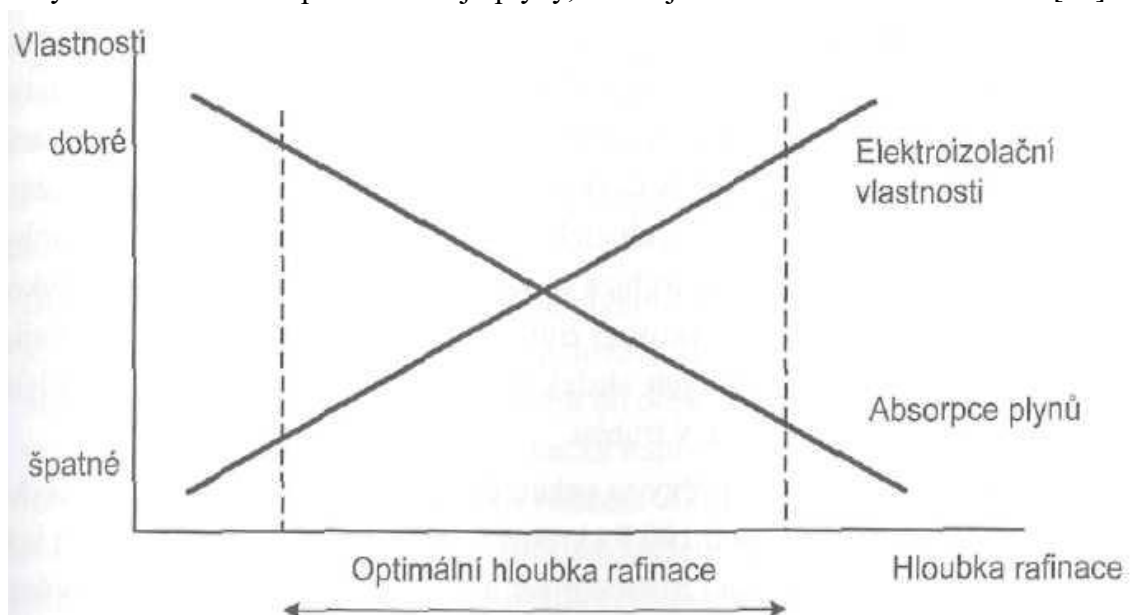
1.4.18 Obsah polychlórovaných bifenylov

Tieto látky patria do skupiny syntetických, chlórovaných, aromatických uhl'ovodíkov. Majú dobré elektrické a tepelné vlastnosti. Tieto látky sú pre životné prostredie nebezpečné, preto sa obmedzuje ich obsah v oleji. Tieto látky sa určujú plynovou chromatografiou [17].

Maximálna povolená hodnota PCB je 2mg/kg . [17]

1.4.19 Plynovanie

Plynovanie je schopnosť oleja absorbovať plyn pod elektrickým namáhaním. Tato vlastnosť je dôležitá hlavne pre špeciálne VN transformátory. Plynovanie je podiel absorpcie a vývinu vodíka v oleji. Plynovanie je závislé od chemickej štruktúry oleja. Oleje ktoré obsahujú väčšie množstvo aromatických uhl'ovodíkov lepšie absorbujú plyny, ale majú horšie elektrické vlastnosti [18].



Obr. 1-13 Vplyv hĺbky rafinácie na absorpciu plynov a elektroizolačné vlastnosti oleja [16]

Meranie prebieha v skúšobnej nádobe s elektródami, na ktorú je pripojená byreta, v ktorej sa zhromažďuje neabsorbovaný plyn z oleja [16].

Všeobecne sa táto hodnota neuvažuje [18].

1.4.20 Analýza plynov plynovou chromatografiou

Touto skúškou je možné určiť tepelné starnutie oleja. Okrem toho sa dá určiť, čo spôsobilo tepelnú degradáciu ako prehriatie, predvýboje, alebo elektrický oblúk. Táto analýza je vhodná pre stroje v prevádzke a ich priamu diagnostiku a monitorovanie. Chromatografiu možno rozdeliť do štyroch skupín, podľa reprodukovateľnosti výsledkov:

- odber oleja zo stroja, jeho odobratie a odvoz do laboratória,
- vytlačenie rozkladových plynov z oleja,
- vlastná chromatografická analýza,
- vyhodnotenie stupňa tepelného zostarnutia a určenie príčiny starnutia [16].

Po získaní plynov z oleja, alebo z plynového relé, sa vzorky analyzujú plynovou chromatografiou. Pre detekciu plynov sa využívajú 2 detektory, jeden na atmosférické plyny ako H_2 , O_2 a N_2 . Druhý detektor je detektor na uhlíkovodíkové plyny, preto je ešte pred ním methanátor, ktorý premieňa oxidy uhlíka na metán, kvôli väčšej presnosti. Pre atmosférické plyny je to detektor tepelnej vodivosti a pre uhlíkovodíky je to plameňovo izolačný detektor [16].

2 PRAKTICKÁ ČASŤ

V tejto časti je opísané meranie minerálneho oleja, skúšobné prípravky a samotné pozorovanie oleja pod mikroskopom a pri priložení napätia na vzorku. Minerálny olej využívaný v elektrických prístrojoch je okrem tepelných účinkov vystavovaný aj elektrickým účinkom. Na olej okrem známych faktorov ako napríklad teplo, atmosféra v nádobe na olej, kyslosť oleja, pevné súčasti stroja ktoré, olej chráni atď., vplyvajú aj občasné faktory, ako napríklad čiastočné výboje, alebo preskoky iskry medzi potenciálmi. V krajných prípadoch pri údere blesku to môže byť aj oblúk, ktorý olej zžháša. V oleji sa rozpadávajú uhl'ovodíkové reťazce a vznikajú sadze. Na vznik sadzí bol postavený prípravok s dvoma elektródami, ktoré sa budú nachádzať pod hladinou oleja a budú vytvárať prirazy v oleji. S týmto prípravkom, okrem vytvárania sadzí v oleji je možné merať elektrickú pevnosť oleja a určiť stratový činiteľ oleja. Na zistenie či sadze v oleji vznikli, sa použije mikroskop. Vďaka nemu bude možné sledovať aj pohyb častíc pri priloženom napätí.

2.1 Popis pracoviska

Pracovisko, na ktorom prebiehalo meranie bolo v skúšobni VUT FEKT vo vedeckotechnickom parku profesora Lista na Technickej 14, Brno. Na pracovisku boli využité skúšobné priestory na skúšanie elektrickej pevnosti pevných izolátorov.

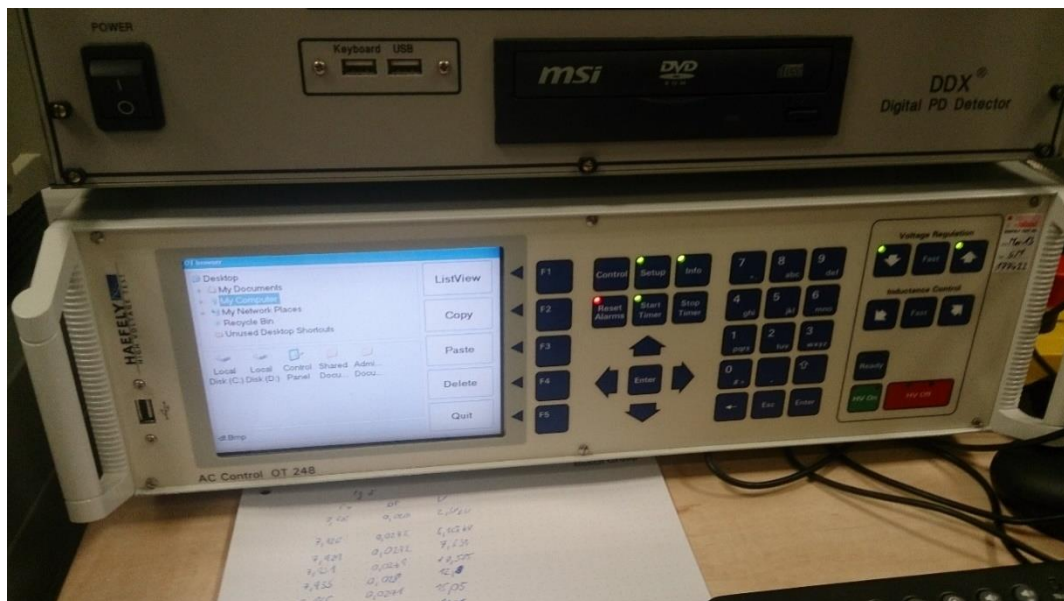
2.1.1 Zdroj a ovládací panel

Ako zdroj bol použitý vysokonapät'ový autotransfómátor s dvoma kondenzátormi a ovládacím panelom vo vedľ'ajšej miestnosti.



Obr. 2-1 Pracovisko pripravené na meranie stratového činiteľa

Ovládací panel na nastavovanie a kontrolu vysokonapät'ového autotransfómátoru bol HAEFELY AC Control OT 248. Tento ovládací panel umožňuje nastaviť strmosť stúpania napätia, maximálne napätie, ktoré pri skúške môže dosiahnuť. Zaznamenáva poslednú hodnotu napätia pred vypnutím (prierazom) a dokáže vykresliť graf priebehu napätia. Umožňuje tiež automatické nastavovanie napätia, alebo taktiež manuálne nastavenie.



Obr. 2-2 Ovládací panel HAEFELY AC Control OT 248

2.1.2 Merací mostík pre určenie stratového činiteľa

Aby sa určil stratový činiteľ, bolo nutné na zdroj pripojiť okrem meraného objektu aj kondenzátor a mostík. Použitý bol mostík TETTEX 2840. S týmto mostíkom sa meria štandardná kapacita C_N , kapacita meraného objektu C_X , stratový činiteľ $\text{tg}\delta$, DF, veľkosť napätia HV, účinník $\cos\phi$, PF, možnosť merania prístroja DUT, meranie milióntiny ppm.



Obr. 2-3 Merací mostík TETTEX 2840

2.1.3 Mikroskop na sledovanie vzorku

Na detailné pozorovanie vzorku bol použitý mikroskop Levenhuk D870T s digitálnou kamerou. Mikroskop má štyri objektívy s priblížením 4x, 10x, 40x a 100x. Kamera mikroskopu bola pripojená ku PC, v ktorom na záznam z kamery bol použitý program Levenhuk TopView.



Obr. 2-4 Mikroskop Levenhuk D870T

2.1.4 Zdroj jednosmerného napätia a voltmeter

Ako zdroj jednosmerného napätia bol použitý zdroj pre scintilačné detektory. Zdroj dáva hodnotu napätia približne v rozmedzí od 600 do 1600V, pri nízkom prúde v desiatkach mikroampérov. Zdroj je napájaný z USB portu. Na nastavovanie napätia bol použitý vysokonapäťový voltmeter, ktorým sa kontrolovalo napätie na výstupe zo zdroja.



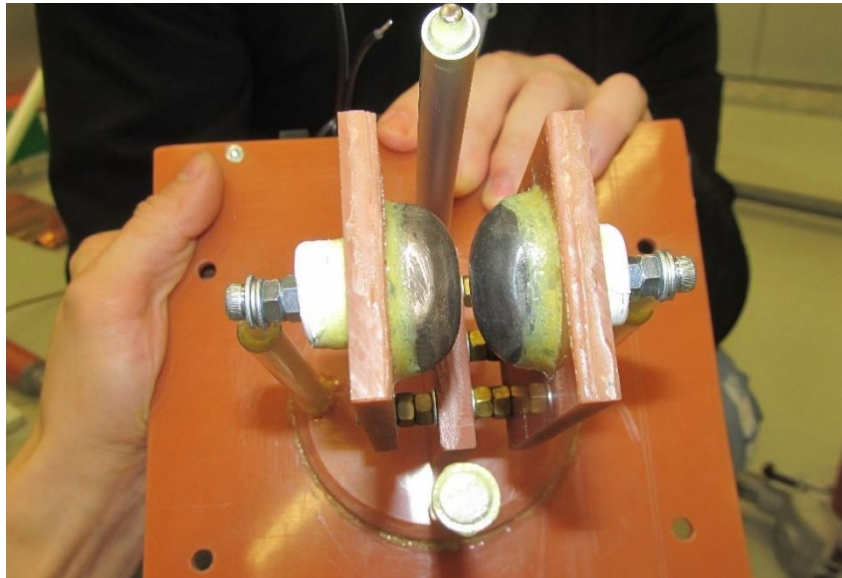
Obr. 2-5 Jednosmerný zdroj napätia



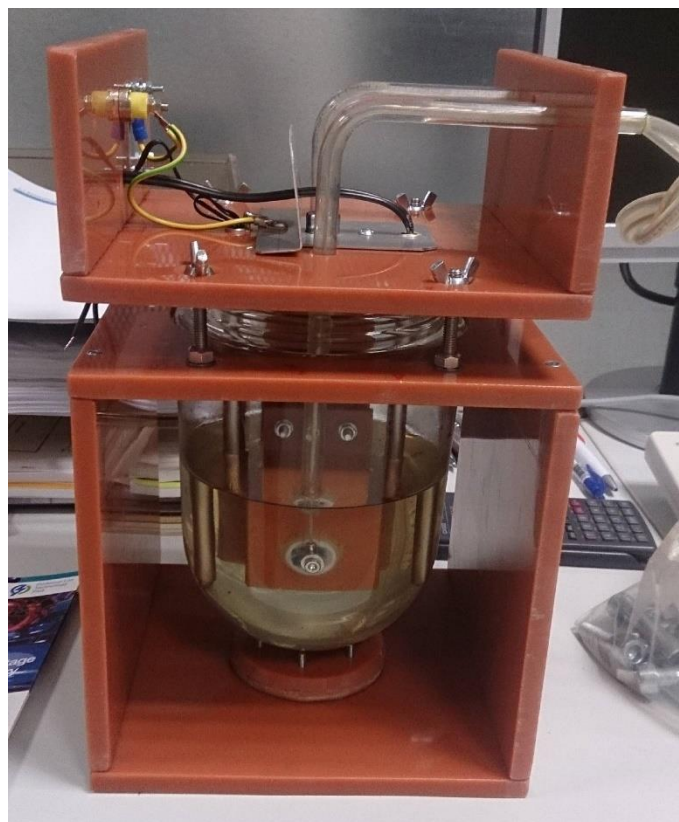
Obr. 2-6 VN voltmeter

2.1.5 Prípravok na meranie elektrickej pevnosti

Tento prípravok bol zostrojený na VUT FEKT. Pri jeho konštrukcii sa vychádzalo z normy ČSN EN 60156. Nosná konštrukcia prípravku je z plastových dosiek, upravených na upevnenie nádoby s olejom. Nádoba na olej je zo skla a je možné ju vybrať z konštrukcie. Samotné elektródy sú pripevnené ku odnímateľnému veku prípravku a sú od seba vzdialené 2,5mm. Elektródy sú vytvorené z oceli a medzera medzi nimi je nastaviteľná. Prívod na elektródy tvoria dva káble. Okrem elektród je v nádobe na olej aj teplomer, ktorý je pripojený na iný potenciál ako elektródy.



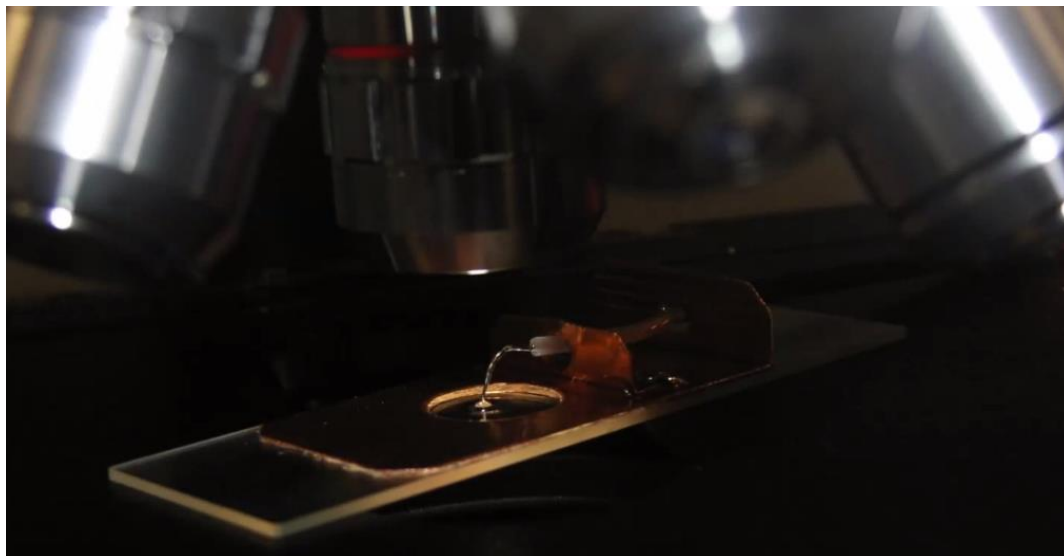
Obr. 2-7 Elektródy prípravku na meranie elektrickej pevnosti



Obr. 2-8 Prípravok na meranie elektrickej pevnosti

2.1.6 Prípravok pre priloženie elektrického poľa na vzorku

Tento prípravok má základ na laboratórnom sklíčku na vzorku. Na tomto sklíčku sú pripevnené dve elektródy. Anóda pokrýva celé sklíčko s výnimkou kruhu o polomere 8 mm, kde v jeho strede je vyvedená katóda. Olej je nutné naniest' do tohto kruhu.



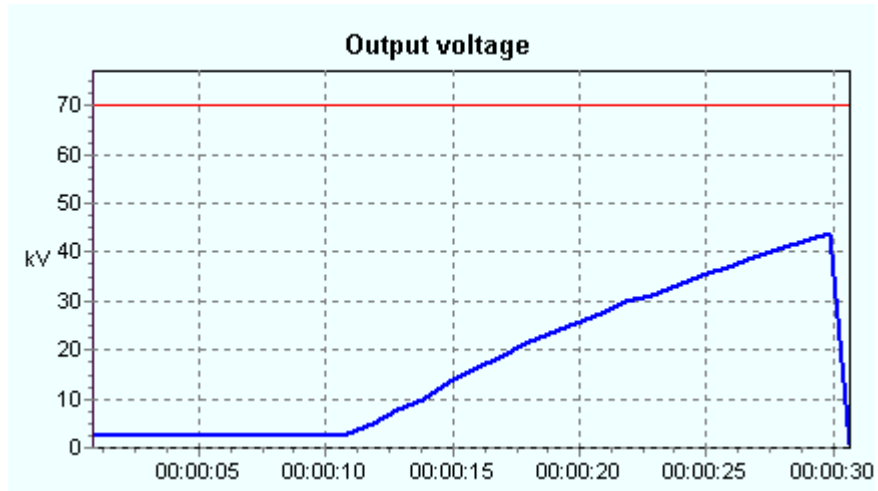
Obr. 2-9 Prípravok na priloženie elektrického poľa na vzorku

2.1.7 Meraný objekt

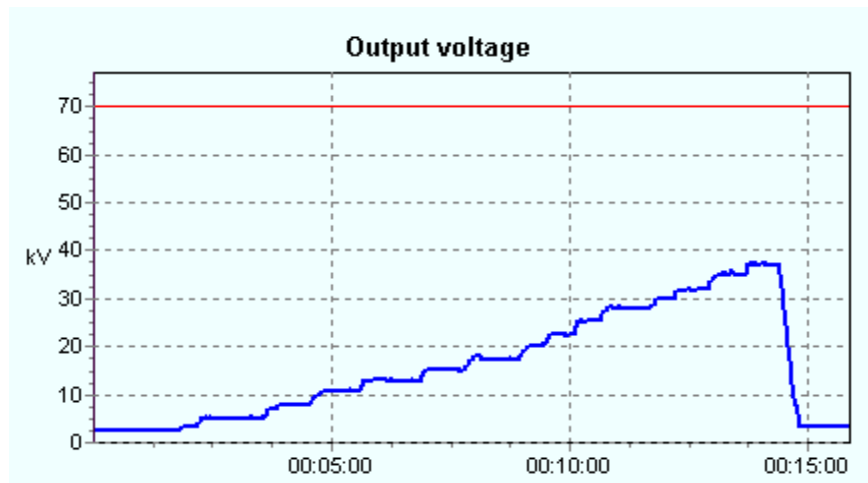
Za meraný objekt bol zvolený univerzálny zástupca minerálneho transformátorového oleja. Tento minerálny olej navonok nevykazuje žiaden typ degradácie, ako tmavšie zafarbenie, alebo okom viditeľné kaly a cudzie látky v jeho obsahu.

2.2 Postup práce

Ako prvý krok bol zapojený prípravok do obvodu podľa schémy na Obr. 2-12 pre meranie elektrickej pevnosti. Do prípravku na meranie elektrickej pevnosti bol opatrne naliaty skúšaný olej, aby v ňom nevznikali pri nalievaní bublinky. Pred nalievaním bolo vnútro prípravku riadne vyčistené. Po naliatí oleja bol prípravok uzavretý a pripojený na obvod. Na ovládacom paneli HAEFELY AC Control OT 248 bolo nastavené zvyšovanie napätia so stúpaním $2 \text{ kV/s} \pm 0,5 \text{ kV/s}$ (Obr. 2-10). Po uplynutí piatich minút sa začalo s meraním elektrickej pevnosti. V oleji bolo urobených 8 prierazov. Po každom prieraze bola čakacia doba dve minúty. Po ukončení skúšky elektrickej pevnosti sa schéma upravila podľa Obr. 2-13 pre meranie stratového činiteľa. Skúška sa začala o 10 minút po ukončení merania elektrickej pevnosti. Pri určovaní stratového činiteľa sa postupovalo s krokom $2,5 \text{ kV} \pm 0,5 \text{ kV}$ od $2,5 \text{ kV}$ až po maximálne možné napätie, pri ktorom ešte nedochádzalo k prierazu oleja. Priebeh napätia je zobrazený na Obr. 2-11. Obidve skúšky sa robili pri frekvencii 50Hz. Po ukončení merania stratového činiteľa sa odobrala vzorka oleja z prípravku na meranie elektrickej pevnosti a vložila sa na prípravok pre priloženie elektrického poľa na vzorku. Sledovali sa vzniknuté sadze a následné pohyby rôznych nečistôt, vrátane sadzí pri priloženom elektrickom poli na vzorku. Elektrické pole bolo jednosmerného charakteru. Pohyb častíc sa sledoval v rozmedzí $0,6 \text{ kV}$ až $1,6 \text{ kV}$ s priblížením 4x. Následne bola odobratá ešte jedna vzorka oleja, pre určenie sadzí vzniknutých v ňom. Pri určovaní a lepšom pozorovaní sadzí sa použili aj iné priblíženia.

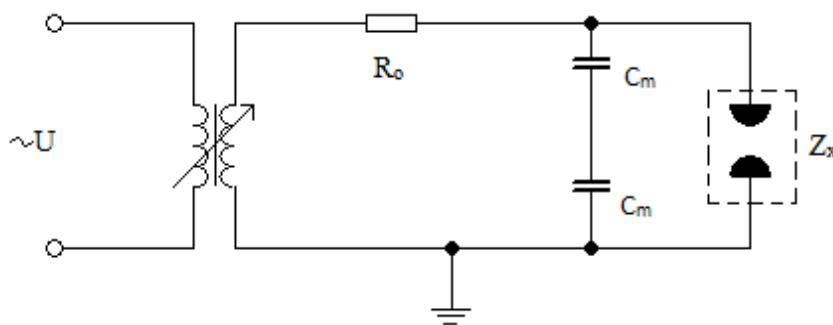


Obr. 2-10 Priebeh napätia pri skúške elektrickej pevnosti

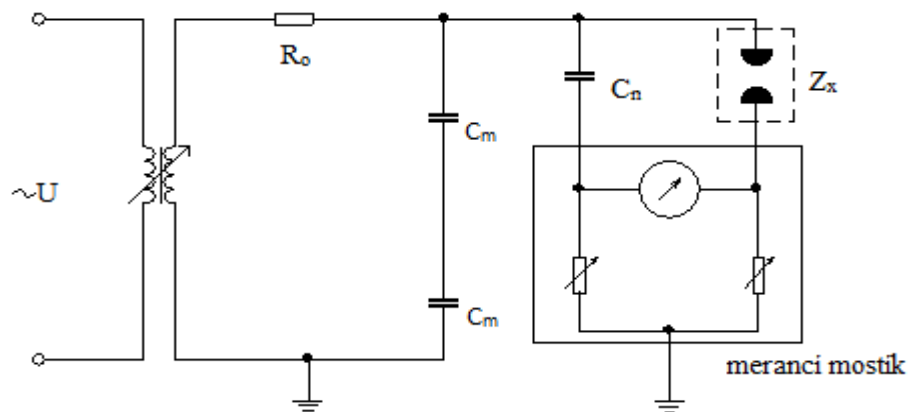


Obr. 2-11 Priebeh napätia pri určovaní stratového činiteľa

2.3 Schémy zapojenia



Obr. 2-12 Schéma zapojenia pre meranie elektrickej pevnosti



Obr. 2-13 Schéma zapojenia pre meranie stratového činiteľa

- Kde: R_o obmedzovací odpor,
 C_m výbojové kondenzátory,
 C_n normálová kapacita s hodnotou 119pF,
 Z_x meraný objekt – olej.

2.4 Odmerané hodnoty a výsledky experimentu

V tejto časti sú zhrnuté odmerané hodnoty prierazného napätia, vyrátaná štandardná odchýlka a určený variačný koeficient. Ďalej je v tejto podkapitole odmeraný stratový v závislosti na napätí a kapacita oleja v závislosti na napätí. Z týchto hodnôt sú ďalej vynesené závislosti. Ďalej ako výsledky experimentu sú fotografie vzniknutých sadzí a fotografie po priložení napätia na vzorku a v prílohe je video vzorky pod napätím.

Tab. 2-1 Podmienky prostredia pri experimente

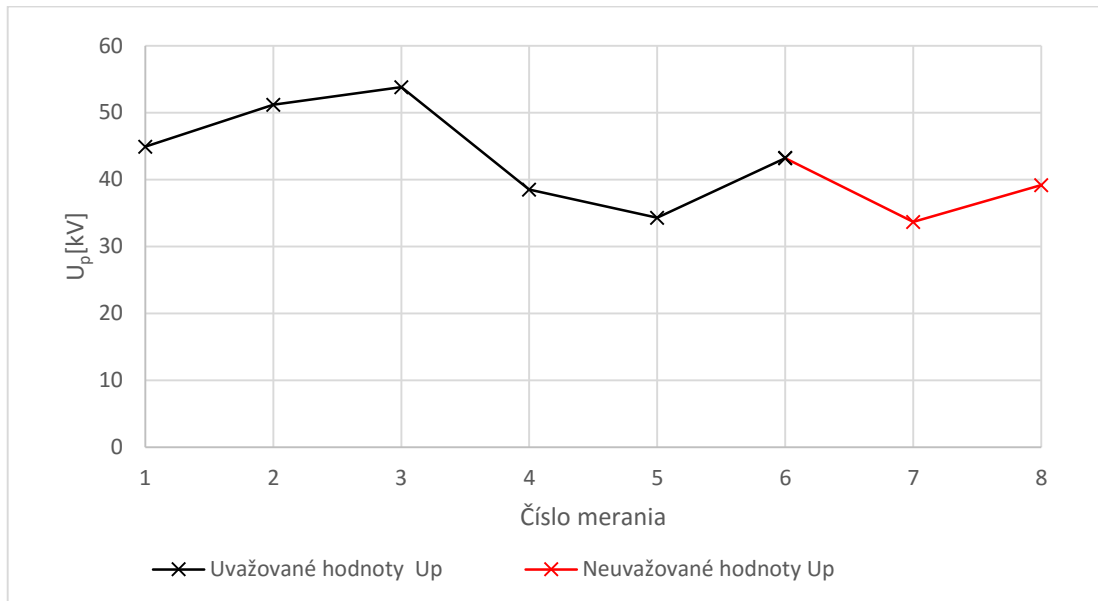
deň merania	teplota okolia	nadmorská výška	tlak	vlhkosť
06.04.2016	23,5°C	320mm	976hpa	34%

2.4.1 Prierazné napätie

Pri určovaní prierazného napätia bolo postupované podľa normy. Vzďialenosť medzi elektródami bola 2,5 mm.

Tab. 2-2 Odmerané hodnoty prierazného napätia

Č. M.	U_p [kV]
1.	44,9
2.	51,2
3.	53,8
4.	38,5
5.	34,3
6.	43,2
7.	33,7
8.	39,2



Obr. 2-14 Graf priebehu prierazného napätia pri skúške

Pri meraní sú vylúčené dve hodnoty, ktoré sa neberú do úvahy. V Tab. 2-2 a na Obr. 2-14 sú tieto hodnoty označené červenou farbou. Na výpočet prierazného napätia použijeme vzorec 1.7, na výpočet štandardnej odchýlky sa použije vzorec 1.8 a výpočet variačného koeficientu vzorec 1.9.

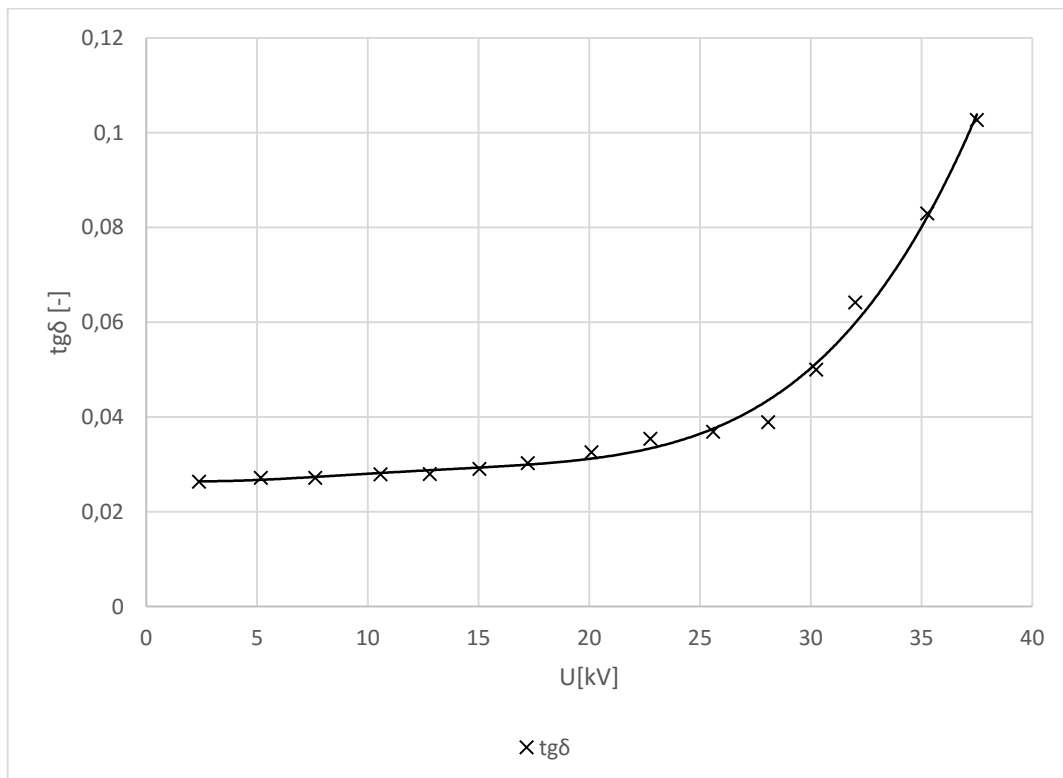
$$\begin{aligned} \bar{U}_p &= \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} = \frac{44,9 + 51,2 + 53,8 + 38,5 + 34,3 + 43,2}{6} = 44,32 \text{ kV} \\ s_2 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{U}_p - U_{pi})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{(41,88 - 44,9)^2 + (41,88 - 51,2)^2 + (41,88 - 53,8)^2 + (41,88 - 38,5)^2}{6-1} + \frac{(41,88 - 34,3)^2 + (41,88 - 43,2)^2}{6-1}} \\ &= 7,39 \text{ kV} \\ v_2 &= \frac{s_2}{\bar{U}_p} \cdot 100\% = \frac{7,39}{44,32} \cdot 100 = 16,68\% \approx 17\% \end{aligned}$$

2.4.2 Stratový činiteľ

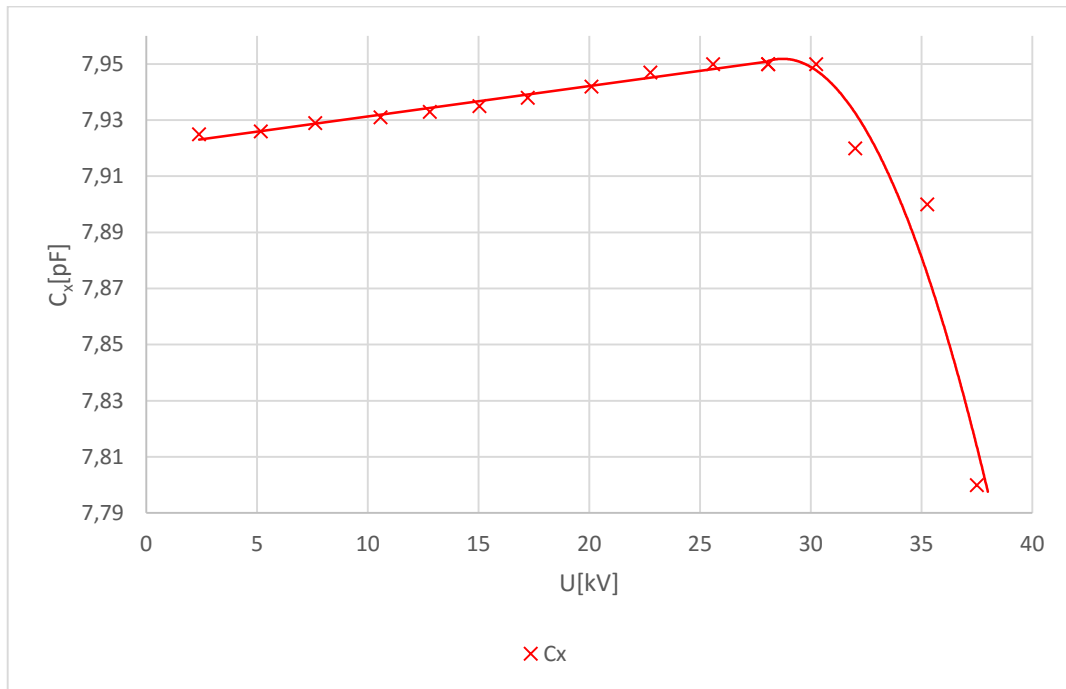
Pri určovaní stratového činiteľa sa skúška robila na tej istej vzorke oleja ako prierazné napätie. Vzdialenosť medzi elektródami ostala 2,5mm.

Tab. 2-3 Odmerané hodnoty stratového činiteľa a kapacity oleja

Č. M.	U[kV]	tgδ [-]	C _x [pF]
1.	2,380	0,0264	7,925
2.	5,168	0,0272	7,926
3.	7,635	0,0272	7,929
4.	10,585	0,0279	7,931
5.	12,800	0,0280	7,933
6.	15,050	0,0291	7,935
7.	17,230	0,0303	7,938
8.	20,100	0,0326	7,942
9.	22,760	0,0354	7,947
10.	25,600	0,0369	7,950
11.	28,080	0,0389	7,950
12.	30,250	0,0500	7,950
13.	32,020	0,0642	7,920
14.	35,260	0,0830	7,900
15.	37,500	0,1027	7,800



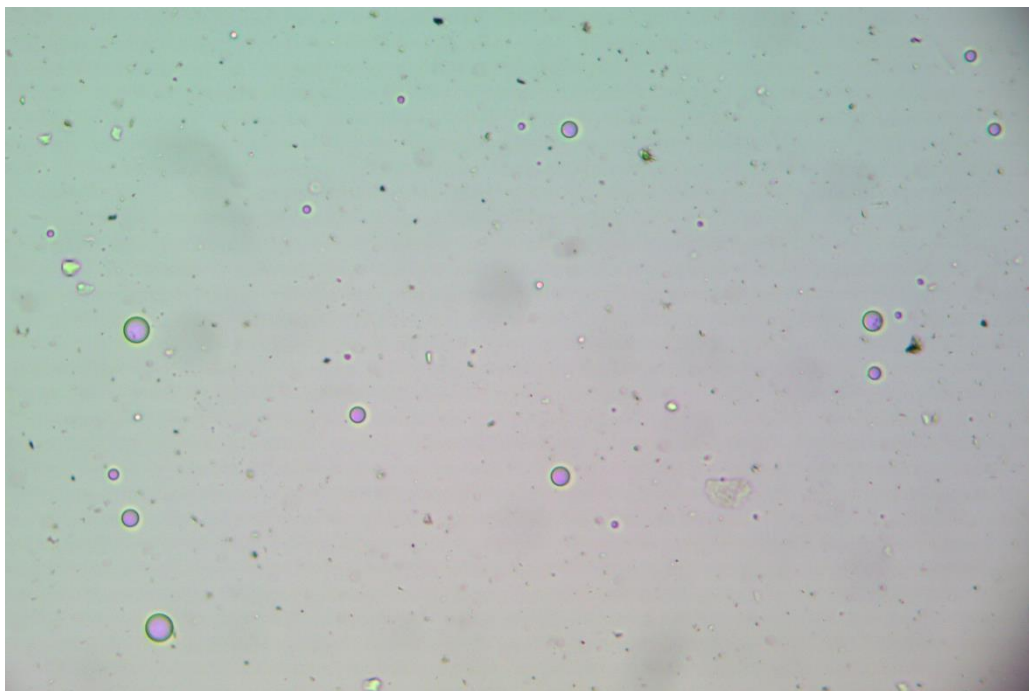
Obr. 2-15 priebeh stratového činiteľa v závislosti na napätí



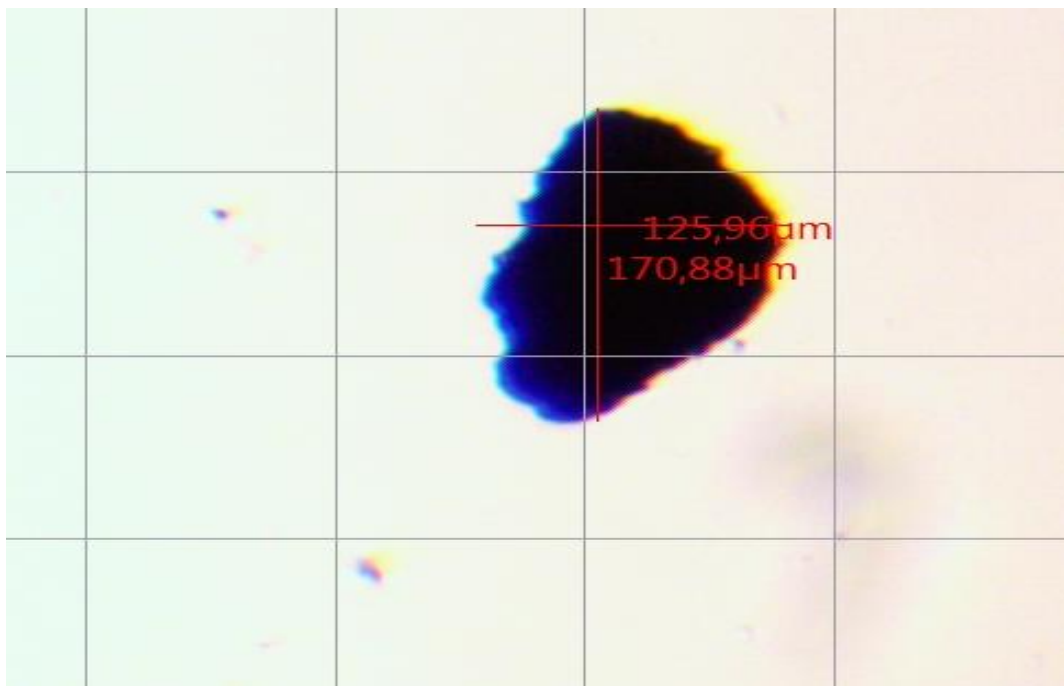
Obr. 2-16 Priebeh kapacity oleja v závislosti na napätí

2.4.3 Skúmaná vzorka oleja

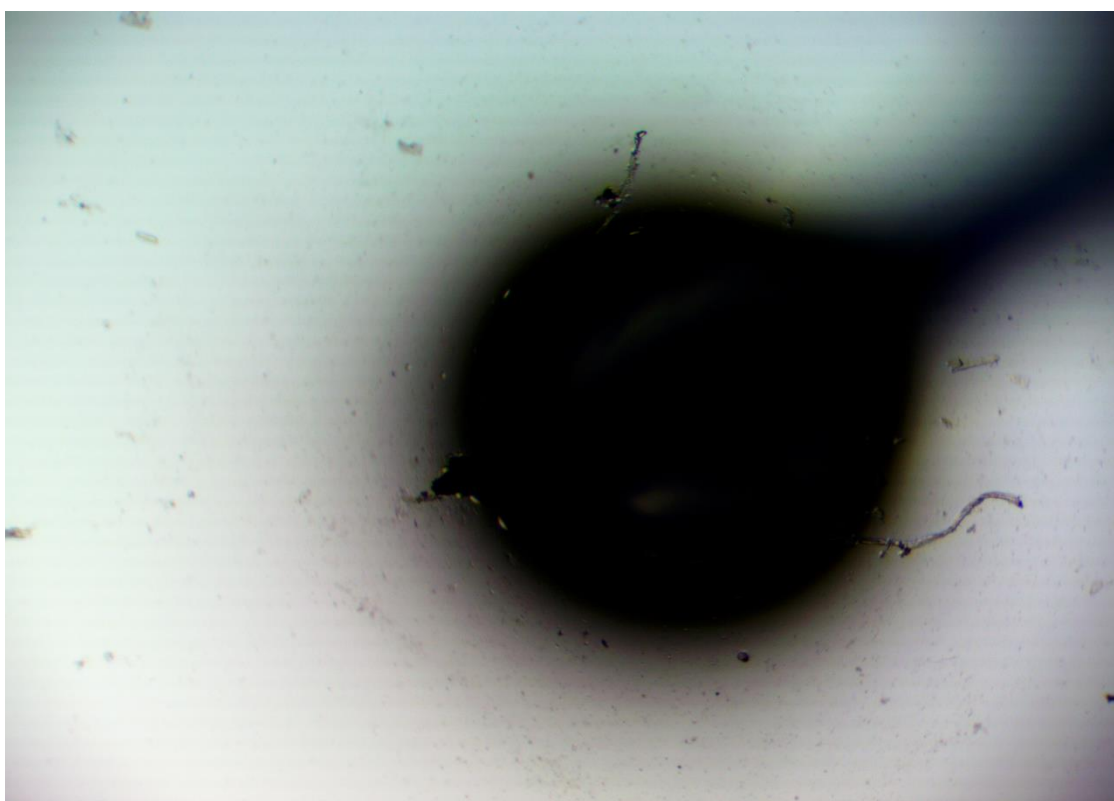
V tejto podkapitole sú fotografie vzorky oleja priblížené mikroskopom. Priblíženia na určovanie sadzí sa využívali v rôznych rozmedziach priblíženia, ale pri sledovaní vzorky s priloženým elektrickým poľom sa využívalo priblíženie 4x. Z nádoby na skúšanie oleja boli odobraté dve vzorky, jedna na určenie sadzí a druhá na priloženie elektrického poľa.



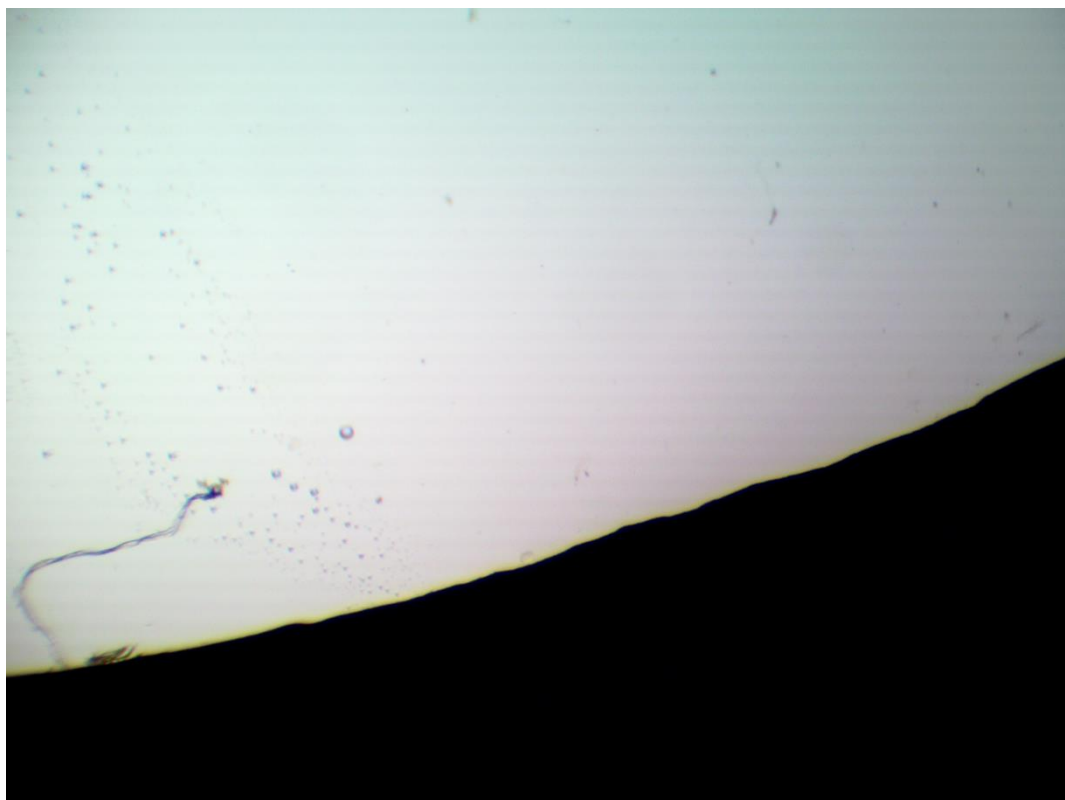
Obr. 2-17 Vzorka minerálneho oleja s priblížením 4x



Obr. 2-18 Sadza v minerálnom oleji o veľkosti 125,96 x 170,88 μm približenie 10x



Obr. 2-19 Vzorka s priloženým napätím 1kV - katóda



Obr. 2-20 Vzorka s přiloženým napětím 1kV - anóda

3 ZÁVER

Na základe zadania bakalárskej práce, boli v teoretickej časti spracované diagnostické skúšky kvapalinových izolantov a postupy vyplývajúce z platných noriem. Sú popísané zaužívané postupy a minimálne hodnoty, ktoré izolant musí spĺňať, aby mohol byť použitý.

V praktickej časti kapitole je popísaný experiment, konkrétne prípravky a skúškami určené elektrické vlastnosti kvapalinového izolantu. Ďalej je v tejto kapitole, podľa zadania použitý mikroskop pre pozorovanie izolantu a určenie jeho degradácie. Táto časť bola venovaná minerálnemu transformátorovému oleju s neznámym stupňom znečistenia a degradácie. Prvá skúška na tomto oleji bola skúška elektrickej pevnosti. Počas tejto bol dodržiavaný postup podľa normy, teda po každom prieraze bola prestávka aspoň 2 minúty. Norma udáva 6 prierazov oleja, ale kvôli neznámemu znečisteniu oleja a stupňa degradácie sa vykonalo prierazov 8. Následne bolo zrátané prierazné napätie a variačný koeficient. Pre vysoký variačný koeficient okolo 21 % boli vylúčené dve hodnoty a opäť určené prierazné napätie a zrátaný variačný koeficient. Výsledné prierazné napätie bolo 44,32 kV a variačný koeficient 17%. Prierazné napätie oleja je vyššie, ako minimálna hodnota určená normou, ale variačný koeficient bez vylúčenia hodnôt bol vyšší ako udáva norma. Veľkosti prierazného napätia sú zobrazené na Obr. 2-14. Z hodnôt ktoré boli brané do výpočtov, je možné usúdiť že najvyššie prierazné napätie bolo 53,8 kV. Po tejto hodnote sa prierazné napätie znížilo a nedosiahlo už hodnoty nad 45 kV.

Ďalšou skúškou bol priebeh stratového činiteľa a kapacity oleja v závislosti na veľkosti priloženého napätia. Z hodnôt v Tab. 2-3 je možné vidieť, že stratový činiteľ bolo možné merať len do 37,5 kV. Po tejto hodnote už v meraní nebolo možné pokračovať, pretože medzi elektródami už vznikali prierazy. Z priebehu je možné vyvodiť, že pri zvyšovaní napätia sa zvyšoval aj stratový činiteľ. Na Obr. 2-15 je možné vidieť, že náhla zmena priebehu stratového činiteľa nastala pri 30 kV. Od tejto hodnoty sa pri každom zvyšovaní napätia zvyšovala nasledujúca hodnota o 1,3 násobok predchádzajúcej hodnoty, zatiaľ čo pred touto hodnotou bolo zvyšovanie sa stratového činiteľa len o 1,003 násobok predchádzajúcej hodnoty. Kapacita oleja mala počas merania stratového činiteľa tendenciu sa zvyšovať až po hodnotu 30 kV. Od tejto hodnoty začala kapacita oleja klesať s veľkou strmosťou, ako je možné vidieť na Obr. 2-16. Pri hodnotách ktoré boli merané s nižším napätím ako 30 kV, bola hodnota kapacity vyššia ako 7,9 pF. Najvyššia hodnota, ktorú kapacita pri meraní dosiahla bola 7,95 pF. Od tejto hodnoty kapacita oleja začala klesať. Posledná najnižšia hodnota kapacity vykázala 7,8 pF.

Pri skúmaní oleja pod mikroskopom, sa hľadali v oleji sadze vzniknuté prierazmi v oleji po skúške a iné nečistoty v oleji. Pri očnej prehliadke odobratej vzorky, v oleji neboli žiadne viditeľné kaly, cudzie látky, alebo sadze. Pri prehliadnutí vzorky pod mikroskopom, bolo možné v oleji vidieť sadze, bublinky a iné nečistoty (Obr. 2-17). Pri zväčšení priblíženia vzorky, bolo možné vidieť sadze o rozmeroch desiatok až maximálne 300 μm . Na Obr. 2-18 je sadza o rozmeroch 125,96 x 170,88 μm . Najmenšia sadza, ktorú bolo možné vidieť vo vzorke oleja, mala rozmer jednotiek μm a bolo ju možné vidieť so 100 násobným zväčšením.

V oleji boli nájdené rôzne nečistoty, sadze vzniknuté po prierazoch v oleji a bublinky. Nečistoty, ako prachové častice sa do oleja mohli dostať rôzne, napríklad pri nalievaní oleja do skúšobnej nádoby, alebo pri odbere vzoriek, ktoré boli skúmané mikroskopom. Bublíny v oleji sa nachádzali v obidvoch odobratých vzorkách z nádoby. Tieto bubliny môžu byť plyny vzniknuté degradáciou oleja, prípadne vznikli pri manipulácii s olejom, alebo to môže byť vyzrážaná voda

z vlhkosti, ktorú olej vstrebal. S najvyššou pravdepodobnosťou to boli bubliny s vodou. Je pravdepodobné, že skúšaný olej bol vlhký.

Na Obr. 2-19 a Obr. 2-20 možno vidieť, že pri priložení napätia skoro všetky nečistoty vrátane niektorých bublín, sa zhromažďovali pri katóde. Niektoré nečistoty vykonávali pohyb medzi anódou a katódou, ale nikdy sa ich nedotkli. Niektoré nečistoty a bubliny konali pohyb medzi anódou a katódou s dotykom. Tieto chaotické pohyby niektorých častíc bolo možné vidieť až pri vyšších hodnotách priloženého napätia. Pri samotnom zvyšovaní napätia sa ku katóde priťahovali aj väčšie objekty. Z toho vyplýva, že čím väčšie elektrické pole bolo priložené, tým väčšia príťažlivá sila pôsobila na nečistoty v oleji. Bubliny a nečistoty, ktoré sa dotýkali elektródy boli nosičom náboja a ich pohyb sa urýchlil s rastúcim elektrickým poľom. Pri katóde vznikol pohyb látky, ktorý sa podobal víru. Tento pohyb vnikal v mieste prívodu na katódu a v blízkosti katódy ako je vidno vo videu v prílohe.

Z toho je možné usúdiť, že pri skúške elektrickej pevnosti začal v nádobe prúdiť olej vďaka priloženému napätiu a meniacej sa teplote oleja pri prieraze. Nečistoty a bubliny v oleji sú polárne, ako je tiež vidieť vo videu v prílohe. Po niekoľkých prierazoch olej začal prúdiť a polárne látky sa začali dostávať medzi elektródy, ktoré ich priťahovali, a tým sa znižovala elektrická pevnosť oleja. V samotných bublinách s nižšou elektrickou pevnosťou začali pred samotným prierazom oleja vznikať prierazy, ktoré viedli k nižšej elektrickej pevnosti samotného oleja.

Pri meraní stratového činiteľa a kapacity oleja je možné predpokladať, že to bolo obdobné. Pri prikladaní stále vyššieho potenciálu sa polárne látky začali polarizovať a vďaka tomu sa zvyšoval stratový činiteľ. Taktiež ho mohla znižovať voda obsiahnutá v oleji. Samotné bubliny obsiahnuté v oleji či vzduchové, alebo naplnené vodou, majú vyššiu elektrickú vodivosť ako olej, aj vďaka nim sa stratový činiteľ zvyšoval. Pri zvyšovaní napätia sa cudzie polárne látky polarizovali stále viac a pri 30kV v oleji začali vznikať menšie preskoky iskier, alebo mikroprierazy ktoré boli zapríčinené týmito látkami a bublinami. Vďaka týmto mikroprierazom mostík občas neukazoval hodnoty a stratový činiteľ začal strmo stúpať. Pri zvyšovaní stratového činiteľa a mikroprierazom v oleji začala prudko klesať aj kapacita oleja.

Z výsledkov meraní a pozorovaní je možné povedať, že olej je viac znečistený ako zdegradovaný. Samotná farba oleja nehovorí o jeho degradácii, pretože zafarbenie oleja bolo na stupnici podľa normy ISO 2049 v rozmedzí 0,5 po 1. Voľným okom sa určilo, že olej by mal byť v poriadku. Pri skúškach sa objavili deje, pri ktorých olej vykazoval vysoké hodnoty stratového činiteľa a veľký rozptyl pri meraní elektrickej pevnosti (postupne znižovanie). Pri pohľade na olej cez mikroskop bolo možné povedať, že je olej znečistený. Bubliny, ktoré v oleji bolo možné vidieť boli s najväčšou pravdepodobnosťou bubliny s vodou, ktorá sa dostala do oleja ako vlhkosť okolia, alebo po prípade bubliny so vzduchom. Olej v sebe obsahoval aj iné znečistenia, ako je vidieť na fotografiách a na videu. Pri pozorovaní oleja pri priloženom napätí, pri katóde vznikol vír. S najvyššou pravdepodobnosťou to bol vír polárnych látok obsiahnutých v oleji.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3191-8.
- [2] REŇÁK, Ladislav. *Elektrická vodivost Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin*. Brno, 2011. Diplomová Práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [3] JAHN, Michal. *Dielektrické vlastnosti kapalných izolantů*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Špinka.
- [4] HEATHCOTE, Martin J. *The J & P Transformer Book*. Velká Británie: Reed Educational and Professional Publishing, 1998. 12. ISBN 07506 1158 8.
- [5] ÚSTAV TECHNOLOGIE ROPY A ALTERNATIVNÍCH PALIV. Petroleum.cz. ÚSTAV TECHNOLOGIE ROPY A ALTERNATIVNÍCH PALIV. *Nerozvětvené alkanany* [online]. 2007, 2016 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/n-alkany.aspx>
- [6] ÚSTAV TECHNOLOGIE ROPY A ALTERNATIVNÍCH PALIV. Petroleum.cz. ÚSTAV TECHNOLOGIE ROPY A ALTERNATIVNÍCH PALIV. *Cykloalkany* [online]. 2007, 2016 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/cykloalkany.aspx>
- [7] ÚSTAV TECHNOLOGIE ROPY A ALTERNATIVNÍCH PALIV. Petroleum.cz. ÚSTAV TECHNOLOGIE ROPY A ALTERNATIVNÍCH PALIV. *Aromatické uhlovodíky* [online]. 2007, 2016 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/aromaty.aspx>
- [8] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [9] ŠTEGBAUER, Radek. *Silikony v elektrotechnice*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [10] ROUS, B. *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. Praha: VŠCHT, 1991. ISBN 80-030-0617-1.
- [11] BARBORKA, Vít. Diagnostika transformatorových olejů v navaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. *ELEKTRO - recenzovaný odborný časopis pro elektrotechniku*. 2002, **12**(7). ISSN 1210-0889. Dostupné také z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085
- [12] KLUČÍK, Peter. *Vplyv bielych plniv na vlastnosti kaučukových zmesí*. Zlín, 2011. Bakalárska práca. Univerzita Tomáše Bati ve Zlne FT.

- [13] MARTON, Karol a Juraj KURIMSKÝ. TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH. *Starnutie elektroizolačných systémov* [online]. Košice, 2007 [cit. 2016-02-29]. 2. ISSN 1337-0103. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fei-kee/jses/uploads/images/jses/jses-02-2007.pdf>
- [14] LEDERER, Jaromír. *Silikonové polyméry* [online]. 2015 [cit. 29.02.2016]. Dostupné z: http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/SILIKONY_.pdf
- [15] Křemík. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2016 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99em%C3%ADk>
- [16] KVES ŽILINA. *Kvapalné izolanty a ich diagnostika* [04 Diagnostika izolačných kvapalín.docx]. Žilina, 2012.
- [17] ČSN EN 60422. *Doporučene parametry pro izolační olej v provozu*. Česká republika: Český normalizační institut, 2011.
- [18] ČSN EN 60296. *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace: Nepoužité minerální Izolační oleje pro transformátory a vypínače*. Česká republika: Český normalizační institut, 2005.
- [19] ČSN ISO 3104. *Ropné výrobky - Průhledné a neprůhledné kapaliny - Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [20] ČSN EN ISO 2719. *Stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku podle Penskyho-Martense*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [21] VERKON S.R.O. Analyzátory bodu vzplanutí Pensky-Martens. VERKON S.R.O. *VERKON* [online]. 2016 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.verkon.cz/analyzatory-bodu-vzplanuti-pensky-martens/>
- [22] STU ÚEAE. *Polylaktrické merania na vysokonapäťovej izolácii*. 2012. Dostupné také z: http://www.kee.elf.stuba.sk/buxus/docs/predmety/TVN/Exercise_11.pdf
- [23] ONLINESHOPSYSTEM © VENDITIO.COM. Neubert Glas. ONLINESHOPSYSTEM © VENDITIO.COM. *Pyknometer nach Boot* [online]. 2016 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: https://www.neubert-glas.de/laborglas/onlineshop/katalog_php/1_995727484085_1030342691843_1081403334390_996581259612/1003135912380/Pyknometer-nach-Boot-.html