

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostika transformátorových olejů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jana PETRILÁKOVÁ**
Osobní číslo: **E13B0138P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostika transformátorových olejů**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte teoretický úvod zabývající se diagnostikou izolantů používaných v transformátorech.
2. Popište vybrané zkušební metody pro diagnostiku transformátorů.
3. Proveďte měření pomocí vybraných zkušebních metod pro diagnostiku transformátorových olejů a zhodnoťte stav dodaných vzorků oleje.
4. Vyhodnoťte naměřená data a proveďte základní statistickou analýzu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
2. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
3. České technické normy (např.: ČSN EN 60422, ČSN EN 60216-1, ČSN 65 6845)
4. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect aj.)


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Hahn


Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na diagnostiku transformátorových olejů a její metodiky. Práce je rozdělena na tři části. První kapitola popisuje izolanty, zejména kapalně izolanty používané v transformátorech a jejich vlastnosti. Součástí první kapitoly je i popis transformátorového oleje. Druhá kapitola je rozdělena do několika částí. První část popisuje údržbu transformátoru, protože úzce souvisí s kvalitou transformátorového oleje. Druhá část popisuje údržbu a manipulaci s transformátorovým olejem. Další části popisují hodnocení oleje v novém zařízení a v provozu. Jsou zde popsány metody na diagnostiku transformátorových olejů. Ve třetí části, je popsán odběr vzorku oleje v TR Výškov a následně jeho vyhodnocení pomocí diagnostických metod.

Klíčová slova

Izolant, transformátorový olej, údržba olejového transformátoru, diagnostika oleje, odběr transformátorového oleje.

Abstract

Presented bachelor thesis is focused on diagnostics of transformer oils and its methods. Thesis is divided into three parts. First chapter contains insulating materials, especially liquid insulating materials used in transformers, and their qualities. Part of the first chapter is description of transformer oil. Second chapter is divided into several parts. First part describes maintenance of the transformer, since it is closely connected to quality of transformer oil. Second part describes maintenance and manipulation with transformer oil. Next parts describes evaluation of oil in a new device and in operation. There are described methods on diagnostics of transformer oils. In third part is described sample collection of oil in TR Výškov and then its evaluation with diagnostic methods.

Key words

Insulant, transformer oil, maintenance of transformer oil, diagnostics of transformer oils, sample collection of transformer oil.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 2.6.2016

Jana Petriláková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Pavlovi Hahnovi za cenné profesionální rady a metodické vedení práce. Velice ráda bych poděkovala panu Ing. Michalovi Nazarčíkovi za ochotu pomoci a umožnění odběru vzorku oleje na TR Výškov a podílet se na diagnostice vzorku oleje. Dále bych chtěla poděkovat paní Ivě Pospíšilové za poskytnutí odborných dokumentů, odbornou pomoc a rady při diagnostikování oleje.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 IZOLANTY	13
1.1. KAPALNÉ IZOLANTY	14
1.1.1. Přírodní oleje	15
1.1.1.1 Rostlinné oleje	16
1.1.1.2 Minerální oleje	16
1.1.2 Syntetické kapaliny	18
1.1.3 Transformátorový olej	19
2 ÚDRŽBA TRANSFORMÁTORŮ Z HLEDISKA OLEJŮ	20
2.1 SKLADOVÁNÍ A MANIPULACE S OLEJI	20
2.2 ODBĚR VZORKŮ OLEJE	22
2.3 HODNOCENÍ STAVU MINERÁLNÍHO OLEJE	23
2.3.1 Kategorie zařízení a kontrola stavu oleje	24
2.3.1.1 Hodnocení stavu minerálního oleje v novém zařízení	25
2.3.2 Hodnocení stavu oleje v provozu	25
2.3.2.1 Barva a vzhled minerálního izolačního oleje	25
2.3.2.2 Stanovení obsahu vody pomocí titrace	26
2.3.2.3 Určení dielektrického ztrátového činitele, relativní permitivity a vnitřní rezistivity při stejnosměrném napětí	29
1.1.1.4. Stanovení čísla kyselosti	34
2.3.2.4 Relativní mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda a stanovení hustoty oleje	36
2.3.2.5 Určení průrazného napětí kapalných izolantů při síťovém kmitočtu, stanovení směrodatné odchylky a variačního koeficientu	40
2.3.2.6 Stanovení obsahu inhibitoru v minerálním izolačním oleji	42
2.3.3 Regenerace transformátorového oleje	44
3 PRAKTICKÁ ČÁST	46
3.1 ODEBÍRÁNÍ OLEJE	46
3.2 DIAGNOSTIKOVÁNÍ OLEJE	48
3.2.1 Obsah vody	48
3.2.2 Průrazné napětí, směrodatná odchylka a variační koeficient	49
3.2.3 Ztrátový činitel, relativní permitivita a vnitřní rezistivita	51
3.2.3.1 Určení ztrátového činitele	52
3.2.3.2 Určení relativní permitivity	53
3.2.3.3 Určení vnitřní rezistivity	53
3.2.4 Mezipovrchové napětí a hustota oleje	54
3.2.5 Obsah inhibitoru	55
3.2.6 Číslo kyselosti	56
3.2.7 Statistická analýza dat	57
3.3 ZHODNOCENÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI	57
ZÁVĚR	58
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	60

PŘÍLOHY 62

Úvod

Nedílnou součástí sítí vn a vvn pro rozvod elektrické energie jsou transformátory. Tyto stroje se musí pravidelně kontrolovat, aby byl zajištěn bezproblémový provoz celé energetické sítě. Vzhledem ke skutečnosti, že v drtivé většině je v transformátorech využit jako izolant a chladicí medium olej, hrozí nebezpečí, že při zanedbané údržbě stroje (spadají sem i kontrolní měření izolačních stavů transformátorových olejů) dojde k poruše stroje a následnému požáru, který má za následek totální devastaci stroje včetně nežádoucích důsledků pro životní prostředí.

Negativní vliv na funkci oleje mají mechanické částice, plyny rozpuštěné v oleji a voda. Snižování kvality neboli stárnutí oleje ovlivňují faktory jako elektrické pole, zvýšený obsah vody a kyslíku, katalytické působení mědi a provozní teplota transformátoru. Stárnutím oleje se vytváří kaly a kyseliny. [1]

Existuje několik druhů elektroizolačních olejů s různými vlastnostmi, podle kterých se určuje jejich využití. Jedny z nejsledovanějších vlastností u elektroizolačních olejů jsou obsah vody v oleji, průrazné napětí, ztrátový činitel a relativní permitivita. Experiment této práce má za cíl popsat vybrané metody k vyhodnocování stavu transformátorového oleje a jejich následné využití v praxi.

Seznam symbolů a zkratek

A	Ampér – základní jednotka elektrického proudu
atd.	A tak dále
BOZP	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci
C ₁₂ H ₁₀	Bifenyl
CO.....	Oxid uhelnatý
cm	Centimetr – jednotka délky
ČEPS, a.s.	Česká energetická přenosová soustava, akciová společnost
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Česká technická norma Evropská norma
DBPC.....	2,6- di- tercbutyl- para- kresol
DBP	Dibutyl ftalát
F.....	Farad – základní jednotka kapacity
F·m ⁻¹	Farad na metr – základní jednotka permitivity
g	Gram – jednotka hmotnosti
g·cm ³	Gram na metr krychlový - jednotka hustoty
g·t ⁻¹	Gram vody na tunu oleje – jednotka obsahu vody
G·Ω·cm	Gigaohmcentimet – jednotka vnitřní rezistivity
G·Ω·m.....	Gigaohmmetr – jednotka vnitřní rezistivity
Hz	Herz – základní jednotka frekvence
HCl	Kyselina chlorovodíková
IEC.....	Mezinárodní elektrotechnická komise
Inhib.....	Inhibovaný
Kat	Kategorie
kg·m ³	Kilogram na metr krychlový – základní jednotka hustoty
KOH	Hydroxid draselný
kV·mm ⁻¹	Kilovolt na milimetr – základní jednotka průrazného napětí
kV·2,5mm.....	Kilovolt na 2,5 milimetru – jednotka průrazného napětí
kV	Kilovolt – jednotka elektrického napětí
mm ² ·s ⁻¹	Milimetr čtvereční za sekundu – jednotka viskozity
mg·KOH·g ⁻¹	Miligram hydroxidu sodného na gram – jednotka spotřeby roztoku
min.....	Minimální
max	Maximální

ml.....	Mililitr – jednotka objemu
mm.....	Milimetr – jednotka délky
mg.....	Miligram – jednotka hmotnosti
mol·l.....	Mol na litr – jednotka molární koncentrace
mol·dm ³ ·KOH....	Počet částic KOH v decimetru krychlovém – jednotka molární koncentrace
mol·cm ³	Mol na centimetr krychlový – jednotka molární koncentrace
N.....	Newton – základní jednotka síly
neinhib.....	Neinhibovaný
nn.....	Nízké napětí
nm.....	Nanometr – jednotka délky
např.	Například
-OH.....	Hydroxylová skupina
PCB.....	Polychlorované bifenyly
p.a.	Označení chemikáliím k analytickému účelu
Ppm.....	Částic na milion – jednotka
SO ₂	Oxid siřičitý
TR.....	Transformátorovna
T 402.....	Číselné označení transformátoru
Tg δ.....	Ztrátový činitel
tzn.	To znamená
tvz.	Takzvaně
T ₅₂₅	Transimnace při vlnové délce 525 nanometrů
TΩ.....	Teraohm – jednotka elektrického odporu
v.č.	Výrobní číslo
vn.....	Vysoké napětí
vvn.....	Velmi vysoké napětí
výk. Kond.	Výkonové kondenzátory
V.....	Volt – základní jednotka elektrického napětí
Ω·m.....	Ohm metr – základní jednotka vnitřní rezistivity
° C.....	Stupeň Celsia – jednotka teploty
ε _r	Relativní permitivita
°.....	Stupeň

Ω Ohm – základní jednotka elektrického odporu

1 Izolanty

Elektrický izolant je materiál, který nevedí elektrický proud. Z fyzikálního hlediska je elektrický izolant materiál, který postrádá nebo obsahuje v zanedbatelném množství volné částice s elektrickým nábojem. Z tohoto důvodu nám neumožňuje převádět elektrický proud mezi materiály, které mají rozdílný elektrický potenciál. [1] [2]

Každý izolant je zároveň i dielektrikem. To znamená, že má vlastní elektrické pole a vlastní polarizovatelnost. Izolant lze polarizovat, vložíme-li ho do elektrického pole, které způsobí deformaci atomu a vytvoří se kladný a záporný pól. Na povrchu izolantu se ale prozatím vytvoří kladný a záporný elektrický náboj, který však zmizí, vyndáme-li izolant z elektrického pole. Zároveň platí, že ne každé dielektrikum je izolant. Proto se u těchto materiálů posuzují vlastnosti, které jsou žádoucí pro správnou funkci izolantu. Jedná se zejména o tepelnou vodivost, pevnost, chemickou odolnost nebo tažnost. [1] [2] [3]

Lze rozlišit několik pojmů, které úzce souvisí se slovem izolant. Pro zjednodušení a ucelení výpočtů se používá pojem ideální izolant, který ve skutečnosti neexistuje. Používali se pojem ideální izolant, myslí se absolutně nevodivá látka, která neobsahuje volné nosiče náboje. Izolátor je již hotový výrobek z izolačního materiálu, například keramický izolátor používaný na elektrickém vedení. Při složení dvou a více izolátorů vznikne soustava s názvem izolace. [4]

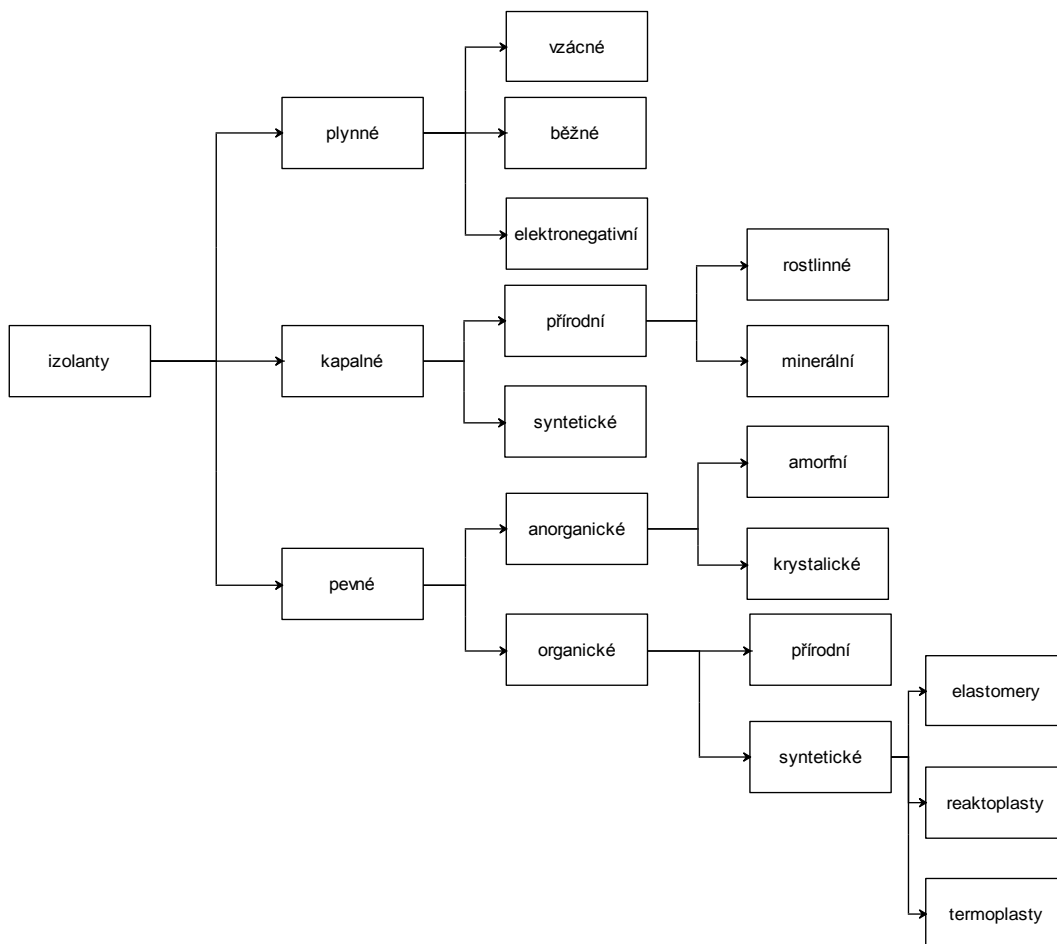
Z důvodů mechanických vlastností izolantů jsou důležité i zkoušky v ohybu, tahu a rázové houževnatosti. Významnou vlastností je rezistivita izolantů. Rezistivita je převrácená hodnota měrné vodivosti. Z toho nám vyplývá požadovaná skutečnost, že čím je větší rezistivita, tím bude menší vodivost a zároveň větší elektrický odpor. Odborná literatura uvádí, že by měla být v rozsahu $10^{12} \div 10^{15} \Omega \cdot m$. [1] [2]

U izolantů se uvádí i relativní permitivita. Tato veličina nám říká, kolikrát se zmenší elektrická síla, když těleso s elektrickým nábojem je umístěno v jiném prostředí než ve vakuu. Izolanty by měli mít co nejnižší ztrátový činitel, který se vyjádří jako poměr činné a jalové složky proudu. [1] [2]

Další kapitoly popisují kapalně izolanty, jelikož je tématem bakalářské práce.

Tab. 1.1 Teplotní třídy izolantů, převzato z [1]

Třída	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Teplota [° C]	90	105	120	130	155	180	200	220	250



Obr. 1.1 Rozdělení izolantů, převzato z [1]

1.1. Kapalně izolanty

V praxi jsou kapalně izolanty hojně využívány díky svým fyzikálním vlastnostem. Zejména protože mají dobrou tepelnou vodivost a viskozitu, tak nám zároveň slouží jako chladicí médium. Kapalně izolanty se rozdělují podle výchozích surovin, z kterých jsou vyrobeny, na syntetické a přírodní, které se pak dělí na minerální a rostlinné. [1] [2]

Rezistivita kapalných izolantů je vždy podmíněná složením i množstvím příměsí, a tím, zda a kolik obsahuje kapalných izolantů nečistot. Jsou oblíbené především proto, že nemají problém vyplnit daný prostor a odvádějí vzniklé teplo. Vyplňují póry tuhých izolantů, se kterými jsou v kontaktu a tím přispívají ke zvýšení izolačních hodnot izolantu a zároveň potlačují možnost elektrického výboje. Kapalně izolanty se řadí k polárním látkám. V těchto látkách není v molekulách rovnoměrně rozdělen elektrický náboj a z tohoto důvodu mohou mít na rozdíl třeba od některých pevných izolantů vyšší elektrickou vodivost. Jednotlivé skupiny kapalných izolantů jsou popsány níže.[1] [2]

Tab. 1. 2 Rozdělení a vlastnosti kapalných izolantů, převzato z [1]

Oleje	Původ, způsob získávání	Složení	Použití, poznámka
Rostlinné	Ze semen rostlin	Směsi esterů, glycerinů a mastných kyselin	Vysychavé oleje, polární látky, $\epsilon_r 3 \div 5$, přísady do izolačních olejů
Ricinový	Skočec obecný		
Lněný	Len setý		
Minerální	Destilací ropy s následnou frakcí	Směsi různých uhlovodíků	Izolační funkce, transformátorové, kabelové a kondenzátorové oleje
Syntetické	Polymerace buténů		
Polybutény	Řízená polymerace buténů		Nepolární, odolné proti oxidaci
Izopropyldifenyl	Alkylace difenyly propylenem		Nepolární, výk. kondenzátory
Silikonové kapaliny	Polydimetylsiloxany		Chemicky stálé
Polychlordifenyl	$C_{12}H_{10}$		Zakázány pro ekologickou zavadnost

1.1.1. Přírodní oleje

Přírodní oleje se rozdělují na dvě skupiny, rostlinné a minerální. Získávají se v případě minerálních z ropy, a v případě rostlinných olejů ze semen rostlin. Hlavní nevýhodou je vysoká hořlavost, kvůli které se začaly vyrábět syntetické oleje, které mají nízkou hořlavost. Následující kapitoly popisují jednotlivé skupiny přírodních olejů. [1] [2]

1.1.1.1 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje jsou směsi různých esterů¹, glycerinů² a nenasycených mastných kyselin, proto jsou málo škodlivé vůči životnímu prostředí. Mezi vlastnosti rostlinných olejů, které lze využít, patří vysoký bod vzplanutí, biologická rozložitelnost a vysychavost. Vysychavost oleje znamená, jak reaguje za přítomnosti kyslíku. Vysychavý olej pomalu tuhne, zatímco nevysychavý olej má stále stejnou konzistenci. V následujících odstavcích jsou popsány někteří zástupci.[1] [2] [7]

Ricinový olej se získává ze skočce obecného, který spadá do skupiny olejů nevysychavých. V elektrotechnice se využívá především k napouštění papírových kondenzátorů zejména pro stejnosměrné obvody. Vzhledem ke svému složení a vlastnostem, má využití v různých oblastech lidské činnosti, například ve stavebnictví, gastronomii a kosmetickém odvětví. Ve stavebnictví se používá jako izolační pěna, která slouží jako obložení při izolaci střech. [2] [8]

Lněný olej, který je zástupcem vysychavých olejů, je získáván ze semen lnu setého. Při chemické reakci u vysychavých olejů dochází k pohlcení kyslíku, proto zde zároveň probíhá oxidace a polymeraci. V dnešní době se lněný olej používá jako přísada do elektroizolačních laků. [2] [9]

1.1.1.2 Minerální oleje

Minerální oleje se vyrábí destilací ropy a následnou rafinací. Minerální oleje pocházejí z ropy, tudíž by mohly při styku s přírodou způsobit ekologické katastrofy či ohrozit zdraví lidí. Minerální oleje dělíme na transformátorové, kondenzátorové a kabelové. [2]

Mezi provozní činitele patří teplota, záření, působení kyslíku a pohlcování vody a plynů. Provozní činitele ovlivňují negativně vlastnosti minerálních olejů, protože narušují jejich strukturu a ony pak degradují. Způsobují vznik kyselin, kalů a usazenin či polymerizaci. Při polymerizaci oleje, dochází ke zvětšování molekul, čímž se zvýší viskozita a zpomalí proudění oleje. Zpomalení proudění oleje vede k zhoršení chlazení

¹ Estery vznikají při esterifikaci, kdy vznikne ester a voda. Používají se jako esence v potravinářství. [5]

² Glycerin je bezbarvá látka, která má sladkou chuť. [6]

transformátoru. Je-li olej v kontaktu se vzduchem, dochází k oxidaci. Aby se potlačila oxidace, tak se do oleje přidávají inhibitory, které prodlužují životnost oleje. Jako katalyzátor může působit i přítomnost kovů, které zapříčiní změnu barvy nebo vylučování kalů. Kalý způsobují selhání chladicí funkce izolačního oleje a z tohoto důvodu může dojít k tepelnému průrazu. Během oxidace kyslíkem vznikají kyseliny, které napadají strukturu pevné izolace. Při zvýšené teplotě olej rychleji degraduje. Následující odstavce se zabývají jednotlivými zástupci. [10]

Kondenzátorové oleje jsou bezbarvé kapaliny vyznačující se velkým vnitřním odporem, malým rozmezím hodnot ztrátového činitele vlivem teploty a vyšší schopností pohlcovat plyny. Používají se jako chladicí médium, jelikož vytlačují vzduch a tím zabraňují korozi. [11]

Kabelové oleje se vyrábí z rafinovaných minerálních olejů, do kterých se zpravidla přidává určité množství pryskyřice, po případě jiné vhodné látky. Kabelové oleje musejí mít velkou elektrickou pevnost a izolační odpor a malý ztrátový úhel. Musejí být čisté, bez kyselin a zásad rozpustných ve vodě a elektricky stabilní. V dnešní době se při výrobě kabelů používají viskosní naftenické oleje zahuštěné kalafunou, viskosní oleje zahuštěné polymery uhlovodíků, oleje s nízkou viskositou a viskosní naftenické oleje pro kabely zvláštních konstrukcí. [1] [2] [12]

Tab. 1. 3 Vlastnosti minerálních olejů, převzato z [1]

Vlastnost		Transformát orový olej	Inhibovaný transformátorový olej	Kondenzá torový olej	Kabelový olej
Hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$ při 20 ° C	900	900	920	940
Viskozita	$[mm \cdot s^{-1}]$ při 20 ° C	40	40	40	300
Bod tuhnutí	[° C] (max)	-40	-40	-40	-8
Bod vzplanutí	[° C] (min)	135	135	130	220
Číslo kyselosti	$[mgKOH \cdot g^{-1}]$ (max)	0,05	0,05	0,05	0,1
Elektrická pevnost $[kV \cdot mm^{-1}]$	V dodaném stavu	95	95	-	-
	Po vysušení	200	200	200	-
Relativní permitivita při 20 ° C		2,1 ÷ 2,4	2,1 ÷ 2,4	2,1 ÷ 2,8	-
$tg \delta$ při 50 Hz	Při 20 ° C (max)	0,015	0,001	0,0012	-

1.1.2 Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny se skládají z polybutylenů³, chlorovaných uhlovodíků⁴, fluorovaných sloučenin, organických esterů a silikonových kapalin. Byly vytvořeny za účelem náhrady hořlavých minerálních olejů, jelikož nenavlhají jako oleje minerální. U Syntetických kapalin jsou kladeny požadavky na ekologickou nezávadnost. V následujících odstavcích je popsána látka PCB, jelikož je zdraví neprospěšná a musí se kontrolovat, zda není přítomná v syntetických olejích. [1] [2]

Izolační kapaliny obsahující PCB, se nachází i upravený bifenyl s chlorem. Tyto syntetické, organické sloučeniny jsou to teplotně odolné a chemicky stálé látky. Je známo přes čtyřicet obchodních názvů, například Delor, Asbestol, Askarel a Bakola. PCB nám mimo jiné může vznikat jako produkt při spalování odpadů či hoření olovnatého benzínu. V minulém století byly materiály obsahující PCB často používány, i přestože nebyly důkladně prozkoumány možné vlivy na životní prostředí. Z důvodu širokého využití těchto materiálů se postupně začala tato látka objevovat v půdě, vodě a potravním řetězci. Nežřídka se stávalo, že při požárech bylo látkami PCB⁵ kontaminováno celé okolí. Ze zdravotního hlediska může tato látka vyvolat například kožní onemocnění, poruchy jater a krevního oběhu. Bylo prokázáno, že při dlouhodobém styku s látkami PCB, mohou v lidském organismu vzniknout rakovinotvorné buňky. Aby se minimalizovaly možnosti kontaktu látek PCB s životním prostředím, byla v roce 1986 vydána mezinárodní dohoda, o principech nakládání s látkami obsahující PCB. Dodržování těchto norem je přísně kontrolováno, a v případě porušení daných směrnic hrozí sankce. V technickém průmyslu se tyto nebezpečné látky využívaly jako chladicí média v kondenzátorech a jako přísady do laků, barviv, vosků a lepidel. Následující odstavec se zabývá vybraných zástupcem syntetických olejů. [2] [13] [14] [10]

Silikonové kapaliny jsou nehořlavé, drahé a odpuzují vodu. Nejčastěji se využívají jako dielektrikum kondenzátorů. Fluorované uhlovodíky mají neblahý vliv na atmosféru a při styku s vodou mají korozivní účinky. Fluorované uhlovodíky se nejčastěji používají k chlazení transformátorů. Naopak chlorované uhlovodíky se dnes moc nepoužívají,

³ Polybutyleny jsou kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků. [1]

⁴ Chlorované uhlovodíky jsou deriváty uhlovodíků, ve kterých jsou některé atomy vodíku nahrazeny elektrickými vlastnostmi atomu chlóru. [15]

⁵ Polychlorované bifenyly patří do skupiny chlorovaných aromatických uhlovodíků, vyznačující se dobrými tepelnými vlastnostmi. [13]

vzhledem k jejich negativním účinkům na životní prostředí. [16]

Následující kapitoly jsou věnovány transformátorovému oleji, jelikož je tématem bakalářské práce.

1.1.3 Transformátorový olej

Transformátorové oleje mají využití v elektrických zařízeních užívaných ve výrobě, distribuci a pro přenos elektrické energie. Transformátorový olej může být syntetický, rostlinný nebo minerální. Dříve se používaly syntetické, ale pro svou ekologickou závadnost se postupně přešlo na minerální oleje. [1] [2] [10]

Výchozí surovinou pro výrobu minerálních transformátorových olejů je ropa. Ropa se dělí podle měrné hustoty na ropu velmi lehkou, lehkou a těžkou a podle typů uhlovodíků na parafinickou, naftenickou a vzácnou ropu aromatickou. Z ropy se nejprve vyrobí základní olej s požadovanými vlastnostmi a ten je výchozí surovinou pro výrobu transformátorového oleje. Při výrobě transformátorových olejů z parafinické ropy se základní olej musí hlavně odparafinovat (oddělení parafinů z důvodů dosažení nižší hodnoty bodu tuhnutí). Při výrobě transformátorových olejů ze základních olejů z naftenické ropy se využívá přirozený nízký bod tuhnutí. Ale tyto oleje mají horší oxidační stabilitu a nižší viskozitu oproti základním olejům vyrobených z parafinické ropy. Základní oleje, které jsou vyrobené z parafinické ropy a mají na rozdíl od základních olejů vyrobených z naftenické ropy vyšší bod vzplanutí (cca 170 °C). V České republice jsou upřednostňovány spíše transformátorové oleje naftenické. [17] [18]

Dále se tyto oleje dělí na neinhibované a inhibované. Neinhibovaný olej se značí písmenem U a je to čistý základový olej. Inhibace oleje znamená, že do oleje byl přidán antioxidační prvek. Podle množství antioxidačního prvku se tyto oleje dále dělí na nízkoinhibované značí se písmenem T a inhibované se značí písmenem I. [17]

U transformátorových olejů se dále udává informace po vysušení popř. po úpravě. Jedná se o úpravu, kdy se odstraňuje z oleje vlhkost. Určuje to, v jakých výkonových hladinách bude elektrický stroj naplněný tímto olejem pracovat. [17]

S kvalitou transformátorového oleje souvisí stav daného transformátoru, proto

následující kapitola popisuje údržbu transformátoru.

2 Údržba transformátorů z hlediska olejů

Před uvedením transformátoru do provozu se musí zkontrolovat, zda jsou všechny kabely a svorky správně zapojeny, všechny části transformátoru na svém místě a správně zapojeny, řídicí systémy jednotlivých částí jsou funkční a nehlásí chyby, a že transformátor odpovídá a je určen k provozování dané činnosti dle popisu výrobce. Následující odstavce popisují jednotlivé druhy pravidelných kontrol v rámci údržby transformátorů. [19]

Jak je zmíněno v Adresné příloze řádu preventivní údržby se rozdělují pojmy pravidelná pochůzka a pravidelná prohlídka. V rámci prevence se provádí pravidelná pochůzková kontrola při normálním provozu. Při této kontrole se provádí především pohledová kontrola ukazatelů hladin olejových náplní, celkového stavu transformátoru s důrazem na kontrolu míst, kde by hrozil únik oleje a stavu poškození porcelánové izolace. [19]

Pravidelná prohlídka se uskutečňuje jednou do roka, kdy je transformátor mimo provoz a odpojen. Během této prohlídky se kontrolují funkce přepínače transformátorů a jejich odečet, transformátorová oběhová čerpadla a ventilátory v případě, že je jimi transformátor vybaven. Sleduje se funkce a vyhřívání jednotlivých částí transformátoru, stav strojových ochran (plynové relé, teploměry, průtokové relé, atd.) signalizace do řídicího systému, spolupráce ochran s vypínači na všech možných vstupech transformátoru a stav transformátorových olejů. Kvalita transformátorového oleje má vliv na činnost a spolehlivost transformátoru a z tohoto důvodu je nutné tomuto médiu věnovat potřebnou pozornost. Olejová náplň nám totiž plní funkci izolantu a chladícího média. Pro zachování potřebné kvality je nutné dodržovat zásady správné manipulace a správného uskladnění těchto olejů, kterými se zabývá následující podkapitola. [19]

2.1 Skladování a manipulace s oleji

V rámci správného skladování a bezpečné manipulace s oleji je nutná maximální ostražitost při jakékoliv manipulaci s olejem a potřeba používat pouze prostředky určené

pro daný úkon. Sudy jsou označovány dle toho, zda jsou určeny pro naplnění čistým nebo špinavým olejem a měly by být vyhrazeny pro konkrétní typ. Sudy a cisterny, které jsou používány pro olej připravený na regeneraci, by neměly být použity pro jiné produkty. Naplněné sudy se skladují v horizontální poloze a měly by být uloženy v takové pozici, aby byla horní hladina na uzávěru nebo zátce. Na sudy se používají speciální kryty, které zamezí přístupu vody a vystavování světlu. Kryt by neměl být vyroben z plastu, jež může způsobit orosení sudů vlivem kondenzace. Naopak při transportu je vhodná vertikální poloha pro sudy kvůli stabilitě a měly by se zakrýt folií. [10]

V praxi se nedoporučuje přelévání oleje z jedné nádrže do druhé, z důvodu možné kontaminace oleje. Místa určená na naplnění olejem by měla být opatřena potrubím, které by zajistilo odvedení kapaliny z čistých nádrží do elektrických zařízení, jež musí být čistá a zbavená vody. Ventily u potrubí musí být pravidelně kontrolovány a udržovány. V případě pohyblivých zařízení, musí být obzvláště pečlivě kontrolovány veškeré ohebné hadice a ruční čerpadla, abychom i mimo jiné zamezili usazení nečistot a vody v těchto částech zařízení. Před použitím musí být vždy veškerá plnicí trasa vizuálně prohlédnutá a propláchnutá k tomu určeným prostředkem. [10]

Hadice musí být označené, zda slouží pro oleje čisté nebo znečištěné. Pokud se hadice nepoužívají, je třeba opatřit zátkami. Materiál, ze kterého jsou hadice vyrobeny, musí být vhodný k práci s těmito oleji. V případě použití hadic, které jsou navzájem spojeny drátem, je potřeba dbát na správné uzemnění, abychom zabránili statickým výbojům. [10]

Aby se minimalizovalo nebezpečí úniků kontrolních vzorků oleje a možnost kontaminace okolí látkami PCB, provádí se pravidelné periodické kontroly zařízení spojeného s užíváním oleje. Samotné přečerpávání olejů se obvykle provádí v uzavřených obvodech, ale i tak nesmíme zapomínat kontrolovat, zda nedochází k úniku olejových výparů do atmosféry. Během prací v olejovém hospodářství vzniká i nebezpečný odpad, například použité filtry. S těmito kontaminovanými materiály se musí po ukončení požadované práce vždy naložit podle směrnic, které řeší jejich uskladnění popřípadě likvidaci. Proto je vhodné zaměřit se na nejlepší dostupnou technologii pro minimalizaci produkce odpadu. V případě práce na zařízení v blízkosti živých částí, se nejprve musí zabezpečit pracoviště tak, aby byly zajištěny bezpečné pracovní podmínky pro odebírajícího technika. Při práci s horkým olejem je také nutné dbát zvýšené opatrnosti. Při

jakékoliv práci s olejem, se musí používat ochranné pomůcky a dodržovat předpisy zabývající se problematikou olejových hospodářství. [10]

S manipulací oleje souvisí i odběr oleje, který je popsán v následující kapitole.

2.2 Odběr vzorků oleje

Při odebírání vzorků oleje je velice důležité dbát na správný technologický postup. I při technologicky správném, ale nepečlivě odebraném vzorku mohou být výsledné hodnoty zkresleny. Z tohoto důvodu je důležité dbát i na skladování a dopravu odebraného oleje. Hrozí nebezpečí, že odebraný vzorek oleje může nasát vzdušnou vlhkost nebo se nasýtit vzdušnými plyny. Olej může být odebírán za normálních provozních podmínek (je-li to možné) nebo ihned po vypnutí daného zařízení. Odběr by měl být proveden osobou, která má požadovanou kvalifikaci, a práci bude vykonávat v duchu příslušné normy, jež se těmito úkony zabývá. V případě, že je k dispozici návod od výrobce zařízení, musí se postupovat v souladu s návodem. Olej se odebírá pokud možno bez přístupu vzduchu v rámci dvou metod. [10] [17]

Pro stanovení plynů rozpuštěných v oleji pomocí plynové chromatografie je olej odebírán do skleněných vzorkovnic o objemu 250 ml. Sklenice musí být bez kohoutků, zakončené olejuvzdornými hadicemi a uzavřené šroubovými tlačkami, které musí být nejméně 30 cm od konce zaškrcené na každém konci. Nejprve se nasadí hadice na výpustní kohout a poté se odpustí zhruba 3 litry oleje. Vzorkovnice musí být umístěná nad výpustním kohoutem tak, aby se hadice spojující vzorkovnici a výpustní kohout byla také nad výpustním kohoutem. Aby nevznikla v hadici vzduchová bublina, promačká se hadice směrem od výpustního kohoutu až ke vzorkovnici. Následně se nechá vytéct zhruba pětinásobný objem vzorkovnice. Při uzavírání výpustního kohoutu se nejprve uzavře tlačka na volné hadici, následně tlačka u výpustního kohoutu a naposledy výpustní kohout. Během celého odběru se dbá na to, aby nevznikla vzduchová bublina a odebírání se nemuselo opakovat. [10] [17]

Při odběru oleje na vyhodnocování dalších zkoušek se oleje odebírají do skleněných láhví o obsahu 1 litr. Sklenice jsou vyrobeny z bílého nebo hnědého skla s úzkým hrdlem a zabroušenou plnou zátkou. Před použitím musejí být sklenice dobře vymyté a vysušené. Nedoporučuje se odebírat olej za deště, mlhy, sněžení a vysoké

relativní vlhkosti vzduchu. Nejprve se nasadí hadice na výpustní kohout a vypustí alespoň 2 litry oleje. Hadice se zasune až ke dnu láhve a začne se napouštět olej, který se nechá přetéct přes okraj láhve. Hadice se vyjme z láhve a nasadí se zátkou na láhev. Opět se nesmí zapomenout na kontrolování vzniku vzduchové bubliny. Na láhev je nutné upevnit označení, které popisuje místo odběru a základní informace pro zjištění stavu oleje, například barvu a teplotu oleje. Vyhodnocování stavu odebraného oleje by se mělo provést nejdéle 5 dnů po odebrání, ale stanovení obsahu vody nejdéle 3 dny. [10] [20]

Výsledky měření oleje lze hodnotit ze dvou hledisek, jako olej v novém zařízení nebo olej v zařízení, které je již v provozu. Následující kapitola popisuje hodnocení oleje.

2.3 Hodnocení stavu minerálního oleje

Pro správnou funkci jako izolační kapalina se musí olej pravidelně kontrolovat, a to při přejímce od dodavatele, před plněním oleje do stroje, před uvedením zařízení do provozu a při provozu zařízení. V následující tabulce jsou limitní hodnoty veličin transformátorového oleje. [10] [20]

Tab. 2.1 Limitní hodnoty pro izolační minerální oleje, převzato z [20]

Veličina	Při přejímce od dodavatele	Před plněním do stroje	Před uvedením do provozu	V záručním provozu	V dalším provozu
Průrazné napětí [kV/2,5mm]	Neměří se	> 75	> 75	> 75	> 65
Číslo kyselosti [mg KOH/2,5 g]	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,10
Obsah vody [g/t]	< 50	< 10	< 12	< 15	< 25
Povrchové napětí [mN/m]	> 50	> 50	> 50	> 45	Inhib. > 35 Neinhib. > 30
Tg δ (při 90 °C) [%]	< 0,3	< 0,3	< 0,5	< 1,0	< 8,0
Obsah inhibitoru [%]	0,3 ÷ 0,5				> 0,1
Rezistivita [Ω.cm.10 ¹²]	> 200	> 200	> 100	> 100	> 5
Obsah plynů hermetizované	Neměří se	< 0,5	< 0,5	< 2,0	< 3,0
nehermetizované	Neměří se	< 0,5	< 1,0	< 8,0	< 9,0
Vodík [ppm]	Neměří se		< 10	< 60	< 150
C ₁ až C ₃ [ppm]	Neměří se		< 10	< 100	< 800
Acetylén [ppm]	Neměří se		< 3	< 10	< 50
CO [ppm]	Neměří se		< 35	< 200	< 500

2.3.1 Kategorie zařízení a kontrola stavu oleje

Každý provozovatel má na svá zařízení různé požadavky, proto byla zařízení rozdělena do jednotlivých kategorií, které jsou popsány v následující tabulce. Podle druhu kategorie se určuje, kolikrát ročně musí být provedena kontrola stavu olejů v transformátorech, počet kontrol za rok je shrnut v tabulce (Tab. 2. 3.). [10]

Tab. 2. 2 Kategorie zařízení, převzato z [10]

Kat.	Typy zařízení
O	Výkonové transformátory/ reaktory o jmenovitém napětí 400 kV a výše
A	Výkonové transformátory/ reaktory o jmenovitém napětí nad 170 kV a do 400 kV. Také transformátory jakéhokoliv napětí, kde je velmi důležité nepřetržité napájení a podobná zařízení pro speciální aplikace, pracující v obtížných podmínkách.
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).
C	Výkonové transformátory/ reaktory o jmenovitém napětí pro VN/NN aplikace, např. o jmenovitém napětí do 72,5 kV včetně a trakční transformátory (jiné než ty, které jsou v kategorii A). Olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí nad 72,5 kV. Olejem plněné spínací zařízení, kovově zapouzdřená rozvodná zařízení pro střídavý proud a o jmenovitém napětí větším nebo rovným 16 kV.
D	Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí nad 170 kV.
E	Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí až do 170 kV včetně.
F	Nádoby přepínačů odboček pod zatížením zahrnující kombinované nádoby pro vodič a přepínač.
G	Olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí do 72,5 kV včetně. Olejem plněná spínací zařízení, kovově zapouzdřená rozvodná zařízení pro střídavý proud o jmenovitém napětí menším než 16 kV.

Tab. 2. 3 Doporučená četnost zkoušení, převzato z [10]

Kategorie zařízení	Počet zkoušek za rok
O	1 ÷ 2
A	1 ÷ 3
B	1 ÷ 4
C	2 ÷ 6
D	1 ÷ 2
E	2 ÷ 6
F	2 ÷ 6
G	2 ÷ 6

2.3.1.1 Hodnocení stavu minerálního oleje v novém zařízení

Vzhledem k tomu, že jsou zařízení vyrobená z různých druhů materiálů a poměru kapalně - pevné izolace, mohou se jednotlivé veličiny lišit, avšak měly by se vejít do limitních hodnot. [10] [20]

Často je zařízení dopraveno naplněné olejem. V tomto případě se pak už jedná o olej v provozu, jelikož byl v kontaktu s jinými materiály. V novém oleji by se měl změřit obsah PCB, aby se potvrdilo, že ho olej neobsahuje. [10] [20]

2.3.2 Hodnocení stavu oleje v provozu

Působením provozních činitelů a vnějších vlivů olej ztrácí své vlastnosti, proto je důležité jeho monitorování a kontrola stavu. [13] [20]

Stavy oleje lze rozlišit do tří kategorií:

- **Dobrý stav**

Olej nejeví známky stárnutí, proto lze pokračovat v předepsaném počtu odběru a kontrolování odebraných vzorků [10].

- **Vyhovující stav**

Olej jeví známky stárnutí, tím pádem se doporučuje častější odběr a kontrolování odebraných vzorků [10].

- **Špatný stav**

Stárnutí oleje je neobvyklé, proto je nutné zavést náležitá opatření [10].

Existuje mnoho metod na určení stavu oleje. Každá metoda je předepsána konkrétní normou, limitní hodnoty jednotlivých veličin jsou součástí jejich norem. Limitní hodnoty nejsou součástí této práce. V této práci je popsáno několik vybraných metod, které jsou poté aplikovány v praktické části.

2.3.2.1 Barva a vzhled minerálního izolačního oleje

Stav oleje lze poznat již podle jeho barvy, v případě že jsou k dispozici dostatečné informace o daném oleji, například typové označení oleje. Při pohledu na olej lze určit stav nejen dle barvy, ale také dle usazenin a kalů. Nový olej je zpravidla bezbarvý až světle

žlutý bez žádných usazenin či kalů, naopak olej s nejvyšším stupněm stárnutí je tmavě hnědý s velkým počtem usazenin a kalů. V případě nového oleje lze předpokládat dopředu, že hodnoty veličin budou v rámci ČSN. Vezme-li se olej s velkým stupněm stárnutí, budou hodnoty veličin vycházet mimo hodnoty dané ČSN. Existují barevné standardy, kde lze porovnat barvu nového a zvoleného oleje. V případě daleko přesnějšího určení barvy, existuje další metoda jak určit barvu oleje je pomocí spektrofotometru, která je popsána v následujících řádcích. [10] [20]

Postup měření

Měření se uskutečňuje při vlnové délce 525 nm ve skleněných kyvetách, které musí být tlusté 1 cm. Kyveta je laboratorní pomůcka, která se používá pro měření optických vlastností tekutin. Princip této metody spočívá v měření propustnosti vzorku zbarveného oleje od barvy světle žluté až do tmavě hnědé při 100 % propustnosti. [20]

Doporučené přístroje

- *Spektrální fotometr* [20]

Vyhodnocení [20]

Výsledné hodnoty se porovnají s tabulkou (Tab. 2. 4) a určí se barva oleje.

Tab. 2.4 Určení barvy na základě propustnosti, převzato z [20]

T ₅₂₅ [%]	Barva oleje	Stupeň zestárnutí
100 ÷ 90	Bezbarvý až světle žlutý	Nový olej
90 ÷ 80	Žlutý	Nový olej
80 ÷ 70	Tmavší žlutý	Nízký
70 ÷ 60	Oranžový až světle hnědý	Střední
60 ÷ 50	Hnědý	Vyšší
50 ÷ 40	Tmavší hnědý	Vysoký
40 ÷ 10	Tmavohnědý	Vysoký
10 ÷ 0	Tmavohnědý se silným zákalem	Vysoký

2.3.2.2 Stanovení obsahu vody pomocí titrace

Stanovením obsahu vody v oleji se zabývá norma ČSN EN 60814. Vlhkost oleje

způsobuje snížení elektrické pevnosti i pevné izolace, také zrychluje stárnutí oleje. Do transformátoru proniká vlhkost z okolní atmosféry, kterou přijímá nejprve olej. V případě, že se olej nasytí vodou a vlhkost olej přesáhne určitý stupeň, přechází voda i do pevné izolace transformátoru. Stanovení obsahu vody v oleji lze určit pomocí dvou metod, jejichž použití závisí na viskozitě oleje. Obě metody jsou založené na tzv. Karl-Fischerově filtračním principu, avšak liší se od sebe potřebnými chemikáliemi. [20]

Princip metody

Metoda je založena na coulometrickým⁶ způsobu vylučování jódu, kde jód není přidáván ve formě odměrného roztoku, ale je vylučován z jodidového roztoku při reakci anodickou oxidací. Reakční baňka se skládá z velkého anodového a menšího katodového prostoru, které jsou od sebe odděleny. Oba prostory obsahují platinové elektrody, indikační a generátorové, pomocí kterých je jód vylučován z roztoku. Vzorek se vloží do anodového prostoru. Anodový prostor se zamíchá a uvolněný jód reaguje s vodou obsaženou v oleji. Přebytek jódu je indikován a tím je ukončeno stanovení. Množství vody se určí z prošlého elektrického náboje. Díky vysoké citlivosti coulometrického stanovení je baňka zcela uzavřena a vzorek je vstříkovan injekční stříkačkou přes oddělovací přepážku. [20] [22]

Potřebné chemikálie [20]

- *Roztok Hydranal – Coulomat A: anodový elektrolyt obsahuje jodid, SO₂, chloroform, nejedovatý amin a metanol*
- *Roztok Hydranal – Coulomat C: katodový elektrolyt, obsahuje analogické komponenty jako roztok Hydranal – Coulomat A*
- *Chloroform*

Popis měřící nádoby

Vnější nádoba tvořící anodový prostor, je uzavřená platovým víčkem s teflonovým těsněním. Pro indikační a generátorovou elektrodu jsou ve víčku udělány dva otvory. Generátorová elektroda je zároveň katodovým prostorem. Dále jsou ve víčku dva otvory

⁶ Coulometrie je metoda, kdy se pro určení množství látky používá měřený prošlý náboj, který je zapotřebí k úplnému průběhu celé reakce. [21]

pro vkládání vzorku, jež jsou upravené přepážkou. Generátorová elektroda je opatřena vysoušecí trubicí s molekulárním sítem. [20] [22]

Postup měření [20] [22]

1. Připojení přístroje k síti.
2. Kontrola připojení elektrod.
3. Nastavení míchaní mezi 5 ÷ 6.
4. Přístroj se zapne, čímž se zapne i míchání. Na displeji se objeví hodnota WAIT 2000, která postupně klesne.
5. Když zazní zvukový signál, objeví se na displeji WATER 0. Zmáčkne se tlačítko DRIFT a vyčká se do ustálení hodnoty.
6. Navolí se požadovaná hodnota extrakčního času 0,1.
7. Vzorkem oleje se několikrát propláchne injekční stříkačka. Poté se naberou 2 ml oleje a jehla se pečlivě otře filtračním papírem.
8. Injekční stříkačka se vzorkem se zvaží.
9. Přepážka v titrační nádobě se propíchne jehlou. Poté se stiskne tlačítko pro zahájení titrace (GO) a zároveň se vstříkne vzorek oleje.
10. Prázdna injekční stříkačka se zvaží a zadá se hmotnost vzorku oleje v mg.
11. Odečte se výsledek v g vody na t vzorku oleje na displeji.

Vyhodnocení [20]

Výsledky se zaznamenají do protokolu o rozboru oleje.

Doporučené přístroje [20]

- *Coulometr*

Náležitosti protokolu [20]

- *Teplota a relativní vlhkost vzduchu laboratoře*
- *Štítkové a provozní hodnoty měřeného objektu*
- *Naměřená hodnota obsahu vody*
- *Datum zkoušky*
- *Číslo protokolu a datum vytvoření protokolu*

2.3.2.3 Určení dielektrického ztrátového činitele, relativní permitivity a vnitřní rezistivity při stejnosměrném napětí

Těmito třemi veličinami se zabývá norma ČSN EN 60247. Aby mohly být změřeny následující veličiny, k měření je třeba speciální kondenzátor. Kondenzátor musí být vyroben z materiálu, který je schopen odolat oleji a vyšším teplotám. Před každým měřením se musí nádoba kondenzátoru rozebrat na části a poté umýt pomocí rozpouštědla (např. toluenu). Následuje opláchnutí horkou a pak teplou vodou, nakonec destilovanou vodou. Po opláchnutí se všechny části umístí do sušárny, kde se suší maximálně 120 minut při teplotách $105 \div 110$ °C. Po vysušení, dokud je kondenzátor ještě teplý, se sestaví všechny části v jeden celek. Sestavování by mělo probíhat s použitím bavlněných rukavic. Pokud se kondenzátor ihned nevyužije k měření, uchovává se v exikátoru, což znamená v suchém a bezprašném prostředí, například nádobě s víkem a silikagelem uvnitř. Následující odstavce popisují jednotlivé veličiny, jejich postupy měření a vzorce. [20] [23]

Dielektrický ztrátový činitel

Na dielektriku, které je připojené na střídavé napětí a protéká jím proud, vznikají dielektrické ztráty. Kdyby se jednalo o ideální dielektrikum, úhel, který svírá vektor připojeného proudu a napětí by byl roven 90 °. V praxi ale neexistuje ideální dielektrikum, pouze reálné, tudíž úhel mezi proudem a napětím je menší než 90 °. Hovoří-li se o ztrátovém úhlu, jedná se o doplňující úhel do 90 °. Tangenta toho úhlu se pak nazývá ztrátový činitel, což je bezrozměrné číslo, avšak v praxi se spíše používá jeho hodnota vynásobená 100krát, tudíž v procentech se zaokrouhlením na čtyři desetinná místa. Při

vyhodnocování stavu je rozhodující teplota měření 90 °C. Ztrátový činitel poukazuje na přítomnost iontových a polárních složek v izolačním oleji. Závisí na teplotě a frekvenci použitého napětí. [20] [24]

Doporučené přístroje [20]

- *Scheringův můstek*
- *Měřicí nádoba (kondenzátor)*
- *Regulátor teploty*
- *Indikátor teploty*

Postup měření [23] [20]

1. Všechny části kondenzátoru se smontují dohromady, poté se kondenzátor připojí k měřicímu zařízení.
1. Určí se elektrická kapacita a ztrátový činitel prázdného kondenzátoru. Veličiny by měly měřeny v rozmezí teplot 15 ÷ 35 ° C.
2. Provedou se tři měření, a to měření při teplotách 20 ° C, 70 ° C a 90 ° C. Temperování vzorku, neboli jeho ohřívání a udržování vzorku na dané teplotě, mezi 1. a 2. měřením by mělo být alespoň 90 minut a temperování mezi 2. a 3. měřením by mělo být alespoň 60 minut. Pro všechna tři měření se doporučuje napětí 2 kV.
3. Pro kontrolu se měření provádí dvakrát a hodnoty se poté porovnají. U ztrátového činitele by rozdíl mezi vyšší a nižší hodnotou neměl převyšovat 15 %.

Náležitosti protokolu [20]

- *Provozní a štítkové hodnoty měřeného objektu*
- *Datum zkoušky*
- *Teplota a relativní vlhkost vzduchu laboratoře*
- *Hodnoty ztrátového činitele při daných teplotách*

Relativní permitivita

Relativní permitivita popisuje chování izolantů v elektrickém poli. Jedná se o poměr kapacity kondenzátoru s dielektrikem a vakuem. Z hodnot relativní permitivity lze určit oxidační zestárnutí izolačního oleje a chemické změny polarity molekul. Relativní permitivita má vliv na rozložení elektrického pole, jelikož je úměrná na stavu dielektrika. Její hodnota roste s rostoucí teplotou a stupněm zestárnutí izolačního oleje. Jedná se o bezrozměrné číslo, které se uvádí na tři desetinná místa. Při určování je rozhodující teplota měření, která se podobá teplotě okolí. [24] [20]

Doporučené přístroje [20]

- *Scheringův můstek*
- *Měřicí nádoba (kondenzátor)*
- *Regulátor teploty*
- *Indikátor teploty*

Postup měření [23] [20]

1. Všechny části kondenzátoru se smontují dohromady, poté se kondenzátor připojí k měřicímu zařízení.
2. Určí se elektrická kapacita a ztrátový činitel prázdného kondenzátoru. Veličiny by měly být měřeny v rozmezí teplot $15 \div 35$ ° C.
3. Provedou se tři měření, a to měření při teplotách 20 ° C, 70 ° C a 90 ° C. Temperování vzorku, neboli ohřívání a udržování vzorku na dané teplotě, mezi 1. a 2. měřením by mělo být alespoň 90 minut a temperování mezi 2. a 3. měřením by mělo být alespoň 60 minut. Pro všechna tři měření se doporučuje napětí 2 kV.
4. Pro kontrolu se provádí dvakrát a hodnoty se poté porovnají. Pro relativní permitivitu platí, že rozdíl mezi vyšší a nižší hodnotou neměl převyšovat 5 %.

Vzorce [20] [24]

Pro hodnotu relativní permitivity platí následující vzorec:

$$\varepsilon_r = \frac{C_0}{C_x} \quad (2.1)$$

kde C_0 je kapacita měrného kondenzátoru [F] s plynným dielektrikem a C_x je kapacita měrného kondenzátoru s kapalným dielektrikem [F].

Náležitosti protokolu [20]

- *Provozní a štítkové hodnoty měřeného objektu*
- *Datum zkoušky*
- *Teplota a relativní vlhkost vzduchu laboratoře*
- *Hodnoty relativní permitivity při daných teplotách*

Vnitřní rezistivita

Hovoří-li se o vnitřní rezistivitě, jedná se o poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř izolantu. Hodnota vnitřní rezistivity závisí na obsahu nečistot, vlhkosti a stupni oxidace izolačního oleje tudíž z hodnot lze vyčíst množství absorbované vody a produkty provozního stárnutí. Hodnota vnitřní rezistivity se zmenšuje se vzrůstající teplotou. Měření se provádí až po odměření ztrátového činitele. Existují dvě metody, jak spočítat vnitřní rezistivitu. První metoda je založena na měření elektrického odporu a k druhé je zapotřebí změřit elektrický proud a následně vypočítat hodnotu pomocí Ohmova zákona. Jednotkou vnitřní rezistivity je $G \cdot \Omega \cdot cm \cdot 10^{12}$ nebo se také udává v $G \cdot \Omega \cdot m$. [23] [20]

Doporučené přístroje [20]

- *Megaohmmetr se zdrojem napětí 200 V a rozsahem do $10^{15} \Omega$*
- *Vyhřívací komora*
- *Indikátor a regulátor teploty*
- *Měřicí nádoba (kondenzátor)*

Postup měření [20] [23]

1. Všechny části kondenzátoru se smontují dohromady, poté se kondenzátor připojí k měřicímu zařízení. Měřicí nádoba se zapojí k měřicímu zařízení, tak aby byl kladný potenciál na venkovní elektrodě.
2. Změří se kapacita prázdného kondenzátoru.
3. Nastaví se zkušební napětí na 200 V.
4. Provedou se tři měření, a to měření při teplotách 20 ° C, 70 ° C a 90 ° C. Temperování vzorku, neboli ohřívání a udržování vzorku na dané teplotě, mezi 1. a 2. měřením by mělo být alespoň 90 minut a temperování mezi 2. a 3. měřením by mělo být alespoň 60 minut.
5. Pro kontrolu se měření provádí dvakrát a hodnoty se poté porovnají. Pro vnitřní rezistivitu platí, že rozdíl mezi vyšší a nižší hodnotou neměl převyšovat 35 %.

Vzorce

Při použití měření elektrického odporu lze spočítat vnitřní rezistivitu, podle následujícího vzorce [20] [23]:

$$\rho_V = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_V \quad (2.2)$$

kde ε_0 je permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$], C_0 je kapacita prázdného kondenzátoru [F] a R_V je hodnota vnitřního elektrického odporu [Ω].

Při použití měření elektrického proud lze spočítat vnitřní rezistivitu, podle následujícího vzorce [20] [23]:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} \quad (2.3)$$

kde K je konstanta kondenzátoru [m], U je odečtená hodnota zkušebního napětí [V] a I je odečtená hodnota proudu [A].

Hodnota konstanty kondenzátoru se spočte podle následujícího vzorce [20] [23]:

$$K(m) = 0,113 \cdot C_0 \quad (2.4)$$

kde C_0 je kapacita prázdného kondenzátoru [F].

Náležitosti protokolu [20]

- *Štítkové a provozní hodnoty měřeného objektu*
- *Teplota vzorku při měření*
- *Teplota a relativní vlhkost vzduchu laboratoře*
- *Datum zkoušky*
- *Hodnota vnitřní rezistivity*

1.1.1.4. Stanovení čísla kyselosti

Stanovením čísla kyselosti se zabývá norma ČSN EN 62021. Číslo kyselosti odpovídá množství zásad, vyjádřené v miligramech hydroxidu draselného na gram vzorku, potřebné ke kolorimetrické titraci zkušebního vzorku v předepsaném rozpouštědle až do neutralizačního bodu alkalické modři. [20] [25]

Doporučené zařízení a chemikálie [20] [26]

- *Analytické váhy s přesností 0,0002 g*
- *Technické váhy s přesností 0,1 g*
- *Titrační baňky 200 ÷ 250 ml*
- *Odměrný válec 20 ml*
- *Mikrobyreta, 2 ml s dělením po 0,02 ml*
- *2-propanol (izopropylalkohol) p.a.*
- *Alkoholický roztok hydroxidu draselného 0,05 mol/l*
- *Alkalická modř 6B*
- *Fenolftalein 0,1 % roztok v 70% ethanolu*
- *Hydrogenftalát draselný*
- *Destilovaná voda*
- *Dusičnan kobaltnatý p.a. 10% roztok ve vodě*
- *Kyselina chlorovodíková 0,1 mol/l*
- *Etanol (obsah vody max. 5 %)*

Postup [20] [25]

1. Slepá titrace – provádí se alkoholickým roztokem KOH 0,05 mol/l při teplotě 25 °C vždy před měřením vzorků. Titruje se třikrát 20 ml rozpouštědla, které obsahuje 1 nebo 2 ml indikátoru alkalické modři 6B. Jakmile se barva změní z modré na červenou a pokud tento stav trvá nejméně 15 sekund, je dosaženo koncového bodu. Poté se vypočte průměrná spotřeba titračního činidla v mililitrech s přesností na 0,001.
2. Titrace – do dobře vymyté a vysušené titrační baňky se naváží u nových olejů 10g dokonale promíchaného vzorku izolačního oleje, u starých 5 g dokonale promíchaného vzorku izolačního oleje.
3. Olej se rozpustí v asi 20 ml titračního rozpouštědla (2- propanolu) a přidá se indikátor alkalická modř.
4. U nových olejů 2 ml, u starých stačí 1 ml indikátoru.
5. Obsah se promíchá a hned titruje hydroxidem draselným při teplotě menší než 25 °C.
6. U nových olejů titrujeme krátce, před titrací je olej modrý, po titraci fialovočervený.
7. U starých olejů titrujeme déle, před titrací je olej zelený, po titraci žlutohnědý.

Vzorce

Číslo kyselosti se počítá s přesností na 0,005 dle vzorce [20] [25]:

$$\check{C}K = \frac{(V_1 - V_0) \cdot C \cdot 56,11}{m} \quad (2.5)$$

kde V_1 je spotřeba alkoholického roztoku 0,05 mol/l KOH použitého pro titraci vzorku [mm], V_0 je spotřeba alkoholického roztoku 0,05 mol/l KOH použitého pro slepou titraci vzorku [mm] a m je závážka vzorku oleje [g].

Náležitosti protokolu [20]

- ***Štítkové a provozní hodnoty měřeného objektu***
- ***Datum zkoušky, číslo protokolu, zhotovitel***
- ***Hodnota čísla kyselosti***

2.3.2.4 Relativní mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda a stanovení hustoty oleje

Pro určení relativního mezipovrchového napětí se musí nejprve zjistit hustota daného vzorku oleje. Hustota oleje se zjišťuje pomocí hustoměru. Olej se nalije do odměrného skleněného válce, vloží se do něj hustoměr a provede se odečítání ze stupnice. Odečet se provede, až se olej ustálí, což je zhruba po půl minutě. [20]

V molekule vody působí síly, které jsou ve všech směrech stejné a jejich výslednice je nulová. V molekule na povrchové vrstvě kapaliny nejsou tyto síly vyrovnané ze strany druhé, v případě vzduchoprázdna a molekuly jsou tím pádem stlačovány do roztoku. Po celém povrchu kapaliny působí síly tak, aby byl co nejmenší počet molekul na povrchu. Povrchové napětí je síla v N, která působí na jednotku délky v povrchu kolmým směrem k délce a tangenciálně k ploše povrchu. [20]

Povrchové napětí je velmi dobrým ukazatelem pro chemické změny ve složení oleje. Hodnoty mohou poukazovat na stárnutí oleje nebo přítomnost polárních látek, kdy vznikají rozpustné organické látky s karboxylovou nebo hydroxylovou skupinou. [20] [27]

Podstata zkoušky [20]

Povrchové napětí se určuje pomocí měření objemu kapky destilované vody nutné k postupu fázového rozhraní voda-olej. Povrchové napětí závisí na velikosti kapky. S rostoucím objemem kapky se zvyšují hodnoty povrchového napětí. Na měření se používají dokonale čistá zařízení, která lze vyčistit chromsírovou směsí. Po vyčištění se vypláchnou destilovanou vodou a vysuší. Vyslovený zákaz platí pro použití saponátových prostředků k vyčištění zařízení.

Doporučené pomůcky a chemikálie [20] [27]

- *Automatická byreta 10 ml (dělená 0,05 ml)*
- *Silnostěnná kapilára (vnější průměr 5-6 mm, vnitřní průměr 0,3 mm, délka min. 50 mm) se zabroušenou stykovou plochou*
- *Filtrační papír*
- *Chromsírová směs*

- *Destilovaná voda*
- *Kolorimetrické válečky o objemu 140 ÷ 200 ml*
- *Silikonová spojovací hadička o vnitřním průměru 5 mm*
- *Laboratorní stojan se svorkou a držákem*

Příprava pro měření

Kolorimetrické válečky [27]

- *Odmaštění pomocí organického rozpouštědla (lékařský benzín)*
- *Mytí v horkém roztoku s vodou*
- *Opláchnutí čistou vodou*
- *Mytí v myčce nádobí, je-li k dispozici*
- *Opláchnutí destilovanou vodou*
- *Sušení v sušárně při 150 °C*

Kapilára na odměrné byretě [27]

- *Kapilára se uchovává ponořená v chromsírové směsi, v případě že chromsírová směs změní barvu z červeno-oranžové na zelenou je potřeba postupovat dle následujících bodů:*
 1. Vyjmutí z chromsírové směsi.
 2. Opakované opláchnutí destilovanou vodou.
 3. Otření filtračním papírem.
 4. Naplnění byrety i kapiláry destilovanou vodou, při naplnění nesmí vzniknout vzduchová bublina.
- *Mezi jednotlivými měřeními se kapilára otírá pouze po celém povrchu*

Byreta a zásobní láhev [27]

- *Před prvním měřením:*
 1. Vyčistění skla chromsírovou směsí.
 2. Opláchnutí vodou.
 3. Opláchnutí destilovanou vodou.
- *Tento proces opakovat v případě, že se voda v byretě dobře nesmáčí stěnu, tzn. tvoří se na stěnách kapky.*

Kalibrace [20]

Kalibrace tkví ve stanovení objemu jedné kapky destilované vody, které se uvolní z kapiláry voně do vzduchu. Před měřením se musí vždy zkontrolovat kalibrace. Důležitou podmínkou kalibrace je, že teplota vody musí být shodná s teplotou vody při vlastním měření.

Postup kalibrace [20]

1. Byreta a kapilára se naplní destilovanou vodou, poté se zjistí, zda se v aparatuře nenachází vzduchová bublina.
2. Kapilára se upevní pomocí držáku ve svislé poloze do středové osy kolorimetrického válečku.
3. Do kolorimetrického válečku se nalije destilovaná voda, kdy konec kapiláry se umístí cca 5 cm od hladiny vody uprostřed válečku.
4. Z byrety se nechá vykatat nejméně 50 kapek.
5. Odečte se objem vyteklé vody na byretě, následně se spočte objem jedné kapky vody.
6. Měření se opakuje 2 ÷ 3 krát, kdy se hodnoty jednotlivých měření nesmí lišit o více než 0,05 ml.

Postup stanovení povrchového napětí izolačního oleje [20]

1. Olej se nalije do kolorimetrického válečku 100 ÷ 110 ml.
2. Ústí kapiláry se osuší papírem, což slouží jako prevence při vytvoření kapky vody na ústí.

3. Ústí kapiláry se ponoří zhruba 1 cm pod hladinu oleje do středu kolorimetrického válečku, poté se nechá odkapat 1 ÷ 2 kapky vody do oleje.
4. Opět se nastaví hladina byrety na nulu před zapnutím čítače.
5. Spustí se čítač a nechají se vykat kapky destilované vody do oleje, doporučuje se pro byretu o objemu 10 ml alespoň 15 kapek.
6. Měření se opakuje 2 krát a jednotlivé hodnoty se nesmí lišit o více než 0,05 ml.
7. Spočte se aritmetický průměr spotřeby vody, ze které se následně vypočítá objem jedné kapky vody uvolněné do oleje.

Použité vzorce

Mezipovrchové napětí se spočítá dle vzorce [20]:

$$\sigma_{H_2O/olej} = V_{H_2O/olej} \cdot (\rho_{H_2O} - \rho_{olej}) \cdot \frac{\sigma_{H_2O/vzduch}}{\rho_{H_2O} \times V_{H_2O/vzduch}} \quad (2.6)$$

kde $V_{H_2O/olej}$ je objem jedné kapky vody vyteklé do vzorku izolačního oleje [ml], $V_{H_2O/vzduch}$ je objem jedné kapky vody vyteklé do vzduchu [ml], ρ_{H_2O} je hustota vody měřená při teplotě 20 °C [$kg \cdot m^3$], ρ_{olej} je hustota oleje při měření stanovena dle ČSN $kg \cdot m^3$ a $\sigma_{H_2O/vzduch}$ je povrchové napětí vody ve vzduchu odečtené z tabulek.

Náležitosti protokolu [20]

- *Šítkové hodnoty*
- *Provozní podmínky měřeného objektu*
- *Změřenou hodnotu mezipovrchového napětí*
- *Datum zkoušky*
- *Číslo protokolu, zhotovitel a datum vytvoření protokolu*

2.3.2.5 Určení průrazného napětí kapalných izolantů při síťovém kmitočtu, stanovení směrodatné odchylky a variačního koeficientu

Těmito veličinami se zabývá ČSN EN 60156. Každý izolační materiál, který je umístěn v elektrickém poli, ztrácí své izolační vlastnosti, v případě že napětí, které na něj působí, přesáhne určitou kritickou hranici. Právě to napětí, při kterém nastane porucha izolačního materiálu, se nazývá průrazné napětí. Velikost průrazného napětí ovlivňuje tvar elektrického pole, čas působení napětí, frekvence, teplota a vlhkost. [20] [28]

Princip metody

Určení průrazného napětí při frekvenci 50 Hz se rozumí jako nejmenší napětí, naměřené při zkoušce, kdy vznikne první výboj mezi elektrodami definovaného tvaru a vzdálenosti. [20]

Doporučené přístroje

K měření je doporučováno několik zařízení, které musí být spojeny a složeny z [20]:

- *Vysokonapětového zkušebního transformátoru*
- *Regulačního transformátoru*
- *Měřicí nádoby*
- *Voltmetru*
- *Signalizační žárovky*
- *Ochranného odporu*

Podmínky měření

Zkušební komůrka [20] [29]

- *Musí být vyrobena z průhledného a chemicky netečného elektroizolačního materiálu, který odolá izolační kapalině a čistícím prostředkům*
- *Musí být zhotovena tak, aby šla co nejjednodušeji rozebrat kvůli čištění elektrod*
- *Stěny musejí být vzdálené nejméně 12 mm od povrchu elektrod*
- *Objem by měl být v rozmezí 300 ÷ 600 ml*

Elektrody [20] [29]

- *Musejí být zhotoveny z mosazi, bronzu nebo korozi-vzdorné oceli*
- *Osa soustavy elektrod musí být vodorovná a vzdálená alespoň 40 mm od horního okraje nádoby*
- *Žádná elektroda se nesmí přiblížit stěně komůrky nebo míchadla*
- *Hloubka ponoření elektrod musí být minimálně 15 mm*
- *Mezera mezi elektrodami musí mít rozměr v rozmezí $2,5 \pm 0,05$ mm*

Míchání [20] [29]

- *Měření je prováděno za neustálého míchání*

Postup měření [20] [28]

1. Nejprve se nádoba a elektrody opláchnou vzorkem izolačního oleje. Nádoba se naplní tak, aby olej při plnění stékal po její stěně. Opět se musí dohlížet na vznik bublin, které se popřípadě odstraní promícháním čisté skleněné tyčinky.
2. Elektrody musejí být ponořené minimálně 15 mm pod hladinou oleje v nádobce.
3. Zhruba 10 až 15 minut po naplnění nádoby se připojí napětí na elektrody a plynule se zvyšuje až do průrazu.
4. V případě použití izolačních kapalin, jejichž kinetická viskozita při zkušební teplotě je pod hodnotu $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (minerální izolační oleje) se v jedné dávce vzorku provede 6 průrazů za sebou v pětiminutových minutových intervalech. Aby se odstranily produkty rozkladu, musí se po každém průrazu izolační kapalina zamíchat, ale nesmí se vytvořit vzduchové bubliny. Pro použití izolačních kapalin s kinetickou viskozitou při zkušební teplotě nad $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ se musí každý z šesti průrazů změřit v nové dávce vzorku.

Použité vzorce

Aritmetický průměr průrazného napětí se spočte dle vzorce [20]:

$$\bar{U}_p = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \text{ [kV]} \quad (2.7)$$

kde U_{pi} je hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů [$kV \cdot 2,5mm$] a n je počet průrazů.

Směrodatná odchylka se spočte dle následujícího vzorce [20]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{U}_p - U_{pi})^2}{n-1}} \text{ [kV]} \quad (2.8)$$

Výpočet variačního koeficientu se spočítá dle vzorce [20]:

$$V = \frac{s}{\bar{U}_p} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.9)$$

Náležitosti protokolu [20]

- *Štítkové hodnoty měřeného objektu*
- *Provozní hodnoty měřeného objektu*
- *Typ měřicího zařízení*
- *Teplota relativní vlhkost vzduchu laboratoře*
- *Počet měření, směrodatná odchylka, střední aritmetická hodnota průrazného napětí a variační koeficient*
- *Číslo protokolu, zhotovitel, datum vytvoření protokolu*

2.3.2.6 Stanovení obsahu inhibitoru v minerálním izolačním oleji

Životnost transformátoru a jeho provozní spolehlivost je závislá na životaschopnosti izolačního systému. Aby se stárnutí oleje zpomalilo, přidává se do oleje inhibitor. Jak je již popsáno v kapitole 1.1.3. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, olej lze rozdělit na inhibovaný a neinhibovaný. Nejčastějším inhibitorem je DBPC a DBP. Minerální oleje jsou inhibované v koncentraci v rozmezí 0,07 ÷ 0,4 %. V průběhu provozu obsah inhibitoru klesá, tudíž je nezbytné stav kontrolovat. [20] [30]

Princip metody

Metoda je stavěna na měření absorpce infračerveného záření při průchodu zkoušeným vzorkem oleje. V inhibitoru DBPC je přítomná skupina -OH, která absorbuje infračervené záření při vlnočtu 3650 cm^{-1} v míře, která je úměrná koncentraci DBPC. Vyhodnocení inhibitoru proběhne na základě sestavení kalibrační křivky. [20] [30]

Doporučené přístroje [20]

- *Infračervený spektrofotometr*
- *Skleněné nebo plastové stříkačky pro plnění kyvet olejem*
- *Váhy s přesností na minimálně 0,001 g pro navážky inhibitoru*
- *Kádinky a ostatní laboratorní pomůcky pro manipulaci se vzorky*
- *Odměrné baňky pro přípravu kalibračních roztoků*

Kalibrace

Kalibrační roztoky se vytvářejí rozpuštěním známého množství inhibitoru DBPC ve vhodném referenčním oleji. Kalibračních roztoků musí být alespoň 5 s koncentrací $0,05 \div 0,5\%$. Rozsahy kalibračních roztoků tvoří jednotlivé body kalibrační křivky. Kalibrační křivka by měla mít lineární charakter a procházet nulou. Na ose x jsou vyneseny koncentrace inhibitoru DPBC a na ose y jsou odezvy infračerveného spektrofotometru při vlnočtu 3650 cm^{-1} . [20] [30]

Postup měření [20]

1. Kyveta se naplní referenčním olejem, poté se změří infračervené spektrum v oblasti kmitočtů $3600 \div 3700\text{ cm}^{-1}$.
2. Kyveta se naplní daným vzorkem oleje a provede se spektrální záznam, ve kterém postupujeme jako v případě referenčního oleje.
3. Pro zjištění hodnoty obsahu inhibitoru v oleji se odečte spektrum referenčního oleje od spektra zkoušeného vzorku. Vyhodnotí se absorpce světla, která je způsobená přítomností inhibitoru DBPC pro vlnočet 3650 cm^{-1} .

Vyhodnocení

V případě že je vytvořena kalibrační křivka podle odstavce o kalibraci, lze převést absorpci světla způsobenou přítomností inhibitoru DPBC na obsah inhibitoru DPBC v oleji pomocí následujícího vzorce [20]:

$$Q_i = \frac{A_i}{a} [\%] \quad (2.10)$$

kde A_i je absorpce při vlnočtu 3650 cm^{-1} způsobená přítomností inhibitoru a a směrnice kalibrační křivky.

Náležitosti protokolu [20]

- *Šítkové hodnoty měřeného objektu*
- *Datum zkoušky*
- *Číslo protokolu, zhotovitel a datum vytvoření*
- *Provozní hodnoty měřeného objektu*
- *Teplota vzorku při měření*
- *Teplota a relativní vlhkost vzduchu laboratoře*
- *Hodnota obsahu inhibitoru*

V případě, že po aplikování některých z metod se ukáže olej jako nevyhovující, následuje jeho regenerace.

2.3.3 Regenerace transformátorového oleje

Regenerace je proces, při kterém se odstraňují nebo snižují rozpustné a nerozpustné polární nečistoty z oleje chemickými fyzikálním procesem. Výsledkem regenerace je buď olej, který odpovídá parametrům normy IEC 60296 nebo olej s nižší oxidační odolností než byl původní olej. Existují dva druhy regenerace. [20]

První druh je kontaktní regenerace, která se moc nevyužívá, jelikož je to energeticky nevýhodné vzhledem k dlouhé době odstávky zařízení. Je založen na principu míchání znečištěného oleje za použití fullerovy hlinky. Fullerova hlinka je aktivní materiál, který má polární síta, kterými umožňuje nepolárním složkám procházet bez zadržení. [20]

Druhý způsob je perkolační regenerace, kdy je olej odebrán ze dna elektrického zařízení, zahřátý na danou teplotu a poté cirkulován přes filtr. Po cirkulaci se olej vrátí do horní části elektrického zařízení. Následně olej proudí přes jednu nebo více kazet, obsahující fullerovy hlinky. V posledním kroku olej opět proudí přes čistící zařízení, které olej zbavuje vody a plynu. [20]

3 Praktická část

Ve spolupráci s firmou ČEPS, a.s. na rozvodně vvn TR Hradec u Kadaně bylo umožněno po provedeném školení BOZP a zaškolení na měřících přístrojích odebírání a diagnostikování vzorku oleje. Diagnostika daného vzorku oleje byla provedena v laboratoři měření olejů TR Hradec u Kadaně ve spolupráci s paní Ivou Pospíšilovou, laborantkou měření olejů s praxí trvající přibližně 26 let.

Olej byl odebírán v letních měsících, ale vzhledem k interním záležitostem firmy ČEPS, a.s. nebyl olej diagnostikován. Následující kapitola se zabývá odebíráním oleje.

3.1 Odebírání oleje

Dne 21. 7. 2015 byl vzorek oleje odebrán za pomoci odborné asistence příslušných techniků. Odběr oleje se konal na transformovně vvn TR Výškov a olej byl odebrán ze spodní části transformátorové nádoby T402. Transformátor byl po dobu odebírání oleje mimo provoz, jelikož se prováděla jeho pravidelná revize a údržba.

Veškeré náčiní k odebírání oleje bylo připraveno a dovezeno kompetentními zaměstnanci firmy ČEPS, a.s. Před odebíráním bylo zkontrolováno, že jsou dodrženy všechny bezpečnostní předpisy a opatření. Nejprve se umístila vhodná nádoba pod kohoutek odběrového místa, který se vztahoval na danou část nádoby s olejem. Do nádoby bylo natočeno zhruba 5 litrů oleje. Následně byl olej z nádoby přelit do speciální láhve. Láhev se nechala přetéci a poté až se na ní nasadilo zabroušené víko, aby v láhvi nevznikla vzduchová bublina. Než se olej uložil do přepravek a následně do vozidla, provedla se pohledová kontrola nečistot v oleji.

Na láhev se připevnil štítek, kde bylo zaznamenáno datum, místo odběru, typ a název transformátu, výrobní číslo transformátoru, barva oleje při pohledové kontrole nečistot. Dále se vyplnil formulář, kde bylo zaznamenáno číslo produktu, teplota oleje při odebírání 50 ° C, okolní teplota 30 ° C a aktuální stav počasí.

Po odebírání oleje následuje jeho diagnostika, které je popsána v další kapitole. Jak je již zmíněno, odebíraný olej nebyl diagnostikován.



Obr. 3.1 Odebírání oleje



Obr. 3.2 Skleněné láhve naplněné olejem

3.2 Diagnostikování oleje

Laboratoř, ve které byla provedena diagnostika, je členem Asociace zkušeben vysokého napětí. V laboratoři se provádí kolem 800 měření ročně. Měření se provádí výhradně pro potřeby firmy ČEPS, a.s. Všechny přístroje jsou kalibrovány každé dva roky.

Olej byl přivezen odbornými pracovníky dne 14. 4. 2016. Měření bylo provedeno až 15. 4. 2016, aby se olej mohl vyrovnat s okolními teplotami a prostředím. Olej byl přivezen ve speciální láhvi. K láhvi byl přiložen štítek, kde bylo napsáno datum a místo odbírání, venkovní teplota, jmenovité napětí daného transformátoru, výrobní číslo a typ transformátoru. Z důvodu ochrany dat, nejsou v protokolu uvedena některá data, například místo odběru. Před samotným měřením byla provedena pohledová kontrola a zjištění barvy oleje, která byla světle žlutá. Barva se zapisuje do protokolu a již podle barvy lze odhadnout stav oleje a následující hodnoty měření. Do protokolu byla zapsána teplota v laboratoři, jejíž hodnota byla 22 ° C, a vlhkost v laboratoři, která byla 34 %. Jakmile se otevře láhev s olejem, olej začne přijímat vzdušnou vlhkost. Z tohoto důvodu se jako první se měřil obsah vody v oleji a poté elektrická pevnost oleje, Další měření vlastností oleje nesouvisí s obsahem vody v oleji, proto bylo měřeno dle libovolného pořadí.

3.2.1 Obsah vody

Zjišťování obsahu vody v oleji se provádí v zásadě jako první měření. K měření byly použity následující přístroje Aquameter KFM 1 000 S, v. č. 959710009 a elektronická váha Mettler-Toledo typ PM480DR, v. č. 1114051928.



Obr. 3.4 Elektronická váha Mettler-Toledo typ PM480DR



Obr. 3.5 Aquameter KFM 1 000 S

Nejprve byla injekční stříkačka, kterou se nabíral olej alespoň třikrát propláchnuta. Na propláchnutí nebyla použita voda, ale vzorek odebraného oleje. Poté se odebralo pomocí injekční stříkačky 1 ml oleje, tak aby nevznikla vzduchová bublina. Injekční stříkačka s olejem byla postavena na váhu a zvážena. Váha se vynulovala. Injekční stříkačka se zapíchla do septy u Aquameteru a do ní byl vypuštěn olej. Následně se zvážíla prázdná injekční stříkačka. Z těchto dvou hodnot byla zjištěna hmotnost oleje. Na Aquameter se zadala váha oleje. Přístroj začal titrovat a vyšla hodnota obsahu vody v oleji.

Tab. 3.1 Naměřené hodnoty

Hmotnost prázdné stříkačky [g]	1,4
Hmotnost oleje [g]	7,8
Hodnota obsahu vody v oleji [g · t⁻¹]	6,8

3.2.2 Průrazné napětí, směrodatná odchylka a variační koeficient

Průrazné napětí se provádí jako druhé měření. Měření bylo použito s přístrojem BAUR DTA 100, v. č. 942920023.

Vzdálenost mezi elektrodami byla nastavena na hodnotu 2,5 mm. Malé množství oleje bylo nalito do určené kádinky, aby se propláchla. Poté se olej vylil a nalil nový, který zaplnil kádinku až téměř po okraj. Kádinka byla vložena do přístroje, poté se do ní hodilo míchadlo. Čekala se patnáct minut a poté začalo šest průrazů. Rozestup mezi jednotlivými průrazy byl okolo deseti minut. Hodnoty průrazů vyjely z přístroje na papíře. Na něm byla



Obr. 3.6 BAUR DTA 100

Tab. 3.2 Hodnoty jednotlivých průrazů

Průraz	Hodnota [kV/2,5mm]
1.	77,5
2.	83,6
3.	83,2
4.	72
5.	88,1
6.	80,3

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty

Průměrná hodnota průrazného napětí [kV/2,5mm]	80,8
Směrodatná odchylka [kV/2,5mm]	5,7

uvedena i směrodatná odchylka a průměrná hodnota průrazného napětí.

Z hodnot směrodatné odchylky a průměru se vypočítal variační koeficient, který byl spočten dle následujícího vzorce:

$$V = \frac{S}{M} \cdot 100 = \frac{5,7}{80,8} \cdot 100 = 7,1 \% \quad (3.1)$$

kde S je směrodatná odchylka [kV/2,5mm] a M je průměr průrazného napětí [kV/2,5mm].

3.2.3 Ztrátový činitel, relativní permitivita a vnitřní rezistivita

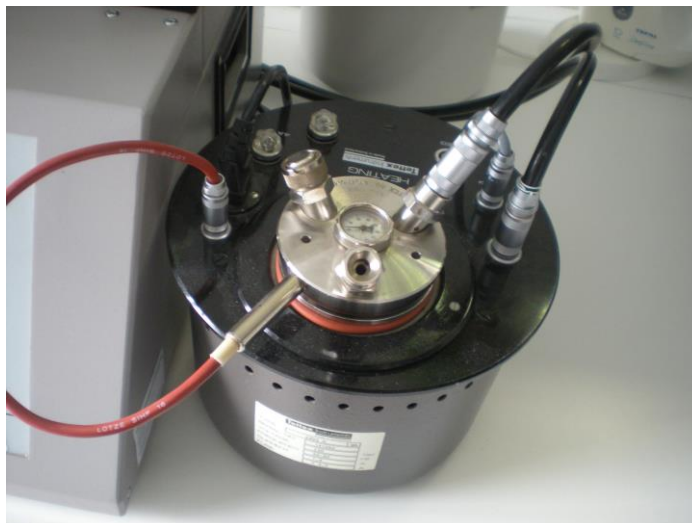
Následující veličiny byly provedeny jako třetí měření. Byly použity tyto přístroje: měřicí můstek Tettex typ 2821 (v. č. 156255) a terraohmmeter Tettey typ 5476 (v. č. 139819). Všechny veličiny se měří při hodnotách napětí 2kV a při teplotách 20 ° C, 70 ° C a 90 ° C. Měření se provádělo od nejnižší hodnoty teploty k nejvyšší.



Obr. 3. 7 Měřicí můstek Tettex typ 2821 a terraohmmeter Tettey typ 5476

K zjištění všech tří veličin slouží speciální kondenzátor, do kterého se nalije olej. Kondenzátor má svorky na připojení dalších měřících přístrojů, připojení na teplotní ohříváč, který nám kondenzátor ohřeje na námi stanovenou teplotu. Všechny naměřené hodnoty se musí porovnat s hodnotami v certifikačním listu, kde se nachází údaje prázdného kondenzátoru. Certifikační list není přiložen z důvodu ochrany dat. Před měřením se vylil starý olej z kondenzační části. Kondenzační část byla vyjmuta z měřícího přístroje a omyta. K omytí byl použit toluen, jelikož se jedná o odmašťovadlo. Kondenzační část byla rozebrána na části a po vysušení se opět složila dohromady a byla

vložena zpátky do přístroje. Nejprve se pomocí přístroje změřila kapacity kondenzační části, která vyšla 1,65728. Hodnoty se porovnaly s údaji v certifikačním listu od výrobce. Hodnoty se shodovaly, proto se do kondenzátoru nalilo 40 ml oleje. Jakmile se naplní



Obr. 3. 8 Kondenzátor

kondenzátor olejem, nesmí se s ním už hýbat. K přístroji se zapojily kabely a vyčkalo se patnáct minut, aby se olej mohl usadit.

3.2.3.1 Určení ztrátového činitele

Nejprve byl přístroj nastaven na teplotu 20 ° C. Po dosažení požadované teploty se odečetla hodnota ztrátového činitele. Následně se provedlo měření pro 70 ° C a 90 ° C.

Tab 3. 4 Naměřené hodnoty ztrátového činitele

Teplota [° C]	Ztrátový činitel [$\cdot 10^{-2}$]
20	0,002
70	0,021
90	0,063

3.2.3.2 Určení relativní permitivity

Po zapsání hodnoty ztrátového činitele se vyčkalo zhruba jednu minutu a kabely byly prohozeny ke svorkám dalšího přístroje, který měří kapacitu. Přístroj má šest úrovní citlivostí, ale byly použity úrovně čtyři, pět a šest. Nejprve se nastavila citlivost na úroveň čtyři a poté se pohybovalo tlačítky (Obr. 3. 6) a to tak, že nejprve se hýbalo tlačítkem 1, až se ručička na displeji dostala na hodnotu 0. Poté se otáčelo tlačítkem 10^{-1} až do hodnoty 0. Takto se postupovalo všemi tlačítky. Na přístroji se tak zobrazila hodnota kapacity kondenzátoru naplněného olejem.



Obr. 3. 9 Tlačítka s citlivostní úrovní

3.2.3.3 Určení vnitřní rezistivity

Jako poslední veličina byla změřena vnitřní rezistivita. Před měřením se opět prohodily kabely a vyčkalo se jednu minutu. Na přístroji se objevila hodnota vnitřního elektrického odporu pro $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Totéž se provedlo i u dalších teplot. Z následující vzorce se vypočítala hodnota vnitřní rezistivity:

Tab 3. 5 Naměřené hodnoty

Teplota[$^{\circ}\text{C}$]	Elektrický odpor[$\text{T}\Omega$]
20	5,52
70	5437
90	160,6

$$\text{Pro teplotu } 20^{\circ}\text{C: } \rho_{v(20^{\circ}\text{C})} = \frac{R_v \cdot 100}{\epsilon_0 \cdot C_0} = \frac{5,52 \cdot 1000}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,65728} = 376,2 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12} \quad (3.2)$$

$$\text{Pro teplotu } 70^{\circ}\text{C: } \rho_{v(70^{\circ}\text{C})} = \frac{R_v \cdot 100}{\epsilon_0 \cdot C_0} = \frac{5437 \cdot 10^9 \cdot 1000}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,65728} = 298 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12} \quad (3.3)$$

$$\text{Pro teplotu } 90^{\circ}\text{C: } \rho_{v(90^{\circ}\text{C})} = \frac{R_v \cdot 100}{\epsilon_0 \cdot C_0} = \frac{160,6 \cdot 10^9 \cdot 1000}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,65728} = 109 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12} \quad (3.4)$$

kde C_0 je kapacita měrného kondenzátoru s plynným dielektrikem [F] a R_V je naměřená hodnota vnitřního odporu [Ω] a ϵ_0 je permitivita vakua.

3.2.4 Mezipovrchové napětí a hustota oleje

Další měření bylo prováděno kvůli zjištění hustoty oleje a poté mezipovrchového napětí. Nejdříve se zjistila hustota oleje a poté se vypočítalo mezipovrchové napětí.

Do kádinky se nalilo 500 ml oleje. Poté se do kádinky vložil hustoměr, který ukázal hodnotu $0,867 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$.

Při zjišťování mezipovrchového napětí se nejprve nalila do kádinky destilovaná voda. Začalo se pumpovat balónkem, až se hodnota na odměrce dostala na hodnotu 0 ml. Spustilo se kapání, kde destilovaná voda kapala do druhé kádinky. Když se na čítači kapek objevila hodnota osmdesát, vypnulo se kapání. Zjistila se hodnota na odměrce. Olej se nalil do kádinky, kam se nakapala destilovaná voda, aby ji zaplnila zhruba do tří čtvrtin objemu. Následně se opět spustilo kapání, ale tentokrát jen dvacet kapek. Potom byla opět zaznamenána hodnota na odměrce. Ta vyšla 9,17 ml. Následně se spočetla hodnota mezipovrchového napětí podle vzorce:

$$\sigma_{H_2O/olej} = 0,4585 \cdot (0,988 - 0,867) \cdot \frac{72,8}{0,988 \times 0,079375} = 51 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1} \quad (3.5)$$

kde $V_{H_2O/olej}$ je objem jedné kapky vody vyteklé do vzorku izolačního oleje [ml],

Tab. 3. 6 Naměřené a vypočítané hodnoty

Počet kapek	Spotřeba vody [ml]	Objem jedné kapky [ml]
20	9,17	0,4585
80	6,35	0,079375

$V_{H_2O/vzduch}$ je objem jedné kapky vody vyteklé do vzduchu, ρ_{H_2O} je hustota vody měřená při teplotě 20 °C, ρ_{olej} je hustota oleje při měření stanovena dle ČSN a $\sigma_{H_2O/vzduch}$ je povrchové napětí vody ve vzduchu odečtené z tabulek.

3.2.5 Obsah inhibitoru

Následovalo měření prováděno pro zjištění obsahu inhibitoru v oleji. K měření byl použit přístroj spectrophotometer Buck Scientific M500 (v.č. 882). Přístroj je připojen na počítač a má speciální program, ve kterém se zobrazuje graf s hodnotami kalibrační křivky. Tento program funguje na principu porovnávání kalibračních křivek inhibovaného a neinhibovaného oleje. Pro měření byla použita kádinka, která byla uložena v silikagelu.

Nejprve se změřil olej bez inhibitoru. Olej se vstříknul do speciální určené kádinky. Kádinka se vložila do přístroje a spustilo se měření. Na obrazovce počítače se zobrazila kalibrační křivka neinhibovaného oleje. Křivka se uložila do paměti programu. Kádinka se vyjmula z přístroje, omyla a vložila do silikagelu.

Poté se vzala nová kádinka, a do ní se vstříkl olej, který byl určen k diagnostikování. Kádinka se vložila do přístroje a ten se spustil. Na obrazovce počítače se začala zobrazovat kalibrační křivka daného oleje. Opět jsme křivku vložili do paměti programu.

Pro zjištění obsahu inhibitoru byl použit program, který porovnal obě uložené křivky, vyšla hodnota 0,36 %.



Obr. 3. 10 Spectrophotometer Buck Scientific M500



Obr. 3. 11 Kádinka použitá na měření

3.2.6 Číslo kyselosti

Jako poslední se měřilo číslo kyselosti. K měření byly použity dvě baňky a chemické roztoky. Při této metodě nebylo možné vykonávat veškerou práci samostatně, tudíž jen bylo přihlíženo na odbornou pracovníci.

Nejdříve byla dokonale vymyta a vysušena titrační baňka. Před samotným měřením se musel zjistit faktor $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{KOH}$, který byl zjištěn dle následujícího postupu, kdy

se odměřilo cca 150 ml liho - toluenové směsi. Přidalo se pár kapek alkalické modři, než směs zmodrala. Do směsi se nalila kapka 0,1 M HCL a pak roztok KOH, který směs zbarvil dočervena. Následně se přidala navážka kyseliny benzenové. Spustila se titrace a spočítal se faktor $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^3 \times \text{KOH}$ dle následujícího vzorce:

$$f = \frac{a \cdot 1000}{b \cdot 122,12 \cdot 0,1} = \frac{0,011 \cdot 1000}{0,59 \cdot 204,23} = 0,09129 \quad (3.6)$$

kde a je navážka kyseliny benzoové [mg], b je spotřeba $0,1 \text{ mol} \cdot \text{cm}^3$.

Poté co se zbarvila směs, byl navážen vzorek oleje, který byl smíchán se směsí. Číslo kyselosti se vypočítalo dle vzorce:

$$\check{K} = \frac{a \cdot f \cdot 56,11}{m} \quad (3.7)$$

kde a je navážka kyseliny benzoové [mg], f je faktor $0,1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^3$ a m je navážka vzorku oleje [mg].

3.2.7 Statistická analýza dat

Vzhledem k tomu, že přístroj sám určil průměrnou hodnotu elektrického průrazu $80,8 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$ a směrodatné odchytky $5,7 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$, je v této části práce počítán pouze medián z hodnot elektrického průrazu.

$$\text{medián} = \frac{83,2+72}{2} = 155,2 \text{ kV}/2,5 \text{ mm} \quad (3.8)$$

3.3 Zhodnocení praktické části

Všechny naměřené hodnoty byly zaznamenány do protokolu. Vzhledem k výsledkům u jednotlivých parametrů byl olej diagnostikován jako dobrý olej. Že je olej nový, se potvrdilo při pohledové kontrole před samotným měřením, kdy byl olej světle žlutý a při stanovení čísla kyselosti, kdy se olej zbarvil dočervena.

Závěr

Hlavní náplní této práce byl experiment, který se zabývá diagnostikou transformátorových olejů a aplikací metod používaných při určování stavu oleje. Olej byl odebrán v létě 2015, ale nebyl z provozních důvodů diagnostikován. Diagnostikovaný olej byl odebrán na jaře 2016. Odebraný vzorek, který byl měřen, spadá do kategorie zařízení O (Tab. 2.2). Ze štítku oleje bylo zjištěno, že je olej v záruční době. Proto byly výsledky měření porovnány s hodnotami pro transformátorový olej v záruční době a kategorii O.

Veškeré hodnoty veličin a postupy jsou zaznamenány v praktické části této práce. Změřil se obsah vody v oleji, který vyšel 6,8 g/t. Norma udává hodnoty $5 \div 10$, tudíž olej je ve stavu vyhovujícím. Průměrná hodnota průrazného napětí, vypočítaná z šesti průrazů vyšla $88,7 \text{ kV} \cdot 2,5 \text{ mm}^{-1}$. Hodnota normy je dána více jak $70 \text{ kV} \cdot 2,5 \text{ mm}^{-1}$, tudíž je olej ve stavu vyhovujícím. K průraznému napětí se vážou hodnoty variačního koeficientu, který vyšel 7,1 a směrodatná odchylka, která vyšla $5,7 \text{ kV} \cdot 2,5 \text{ mm}^{-1}$. Oba výsledky jsou v rámci limitních hodnot. Dále se změřil obsah inhibitoru 0,36 %. Mezní hodnoty jsou $0,3 \div 0,5$ %, což znamená, že je olej vyhovující. Při zjišťování mezipovrchového napětí byla zjištěna hodnota $51 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, která splňuje předepsanou hodnotu, jež je více jak $45 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. Pro výpočet mezipovrchového napětí, se musí určit hustota oleje. Hustota oleje vyšla $0,867 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Jako další veličina byla změřena hodnota ztrátového činitele. Pro teplotu 20°C vyšla hodnota $0,002 \cdot 10^{-2}$, pro teplotu 70°C vycházel ztrátový činitel $0,021 \cdot 10^{-2}$ a pro teplotu 90°C vycházel ztrátový činitel $0,063 \cdot 10^{-2}$. Z výsledků lze říci, že při zvyšování teploty, hodnota ztrátového činitele roste a tudíž vznikají větší ztráty. V normách jsou udány limitní hodnoty pouze pro 90°C , které jsou méně jak jedna, tudíž je olej opět vyhodnocen jako vyhovující. U relativní permitivity se opět měřilo s třemi teplotami, jako u předchozí veličiny. Při teplotě 20°C vyšel výsledek 2,192, při teplotě 70°C vyšla relativní permitivita 2,141 a pro teplotu 90°C vyšla hodnota 2,119. Z klesajících hodnot vyplývá, že zde není patrné zestárnutí oleje. Poslední měřená veličina byla vnitřní rezistivita. Opět se měřilo s třemi teplotami. U teploty 20°C byla změřena vnitřní rezistivita $3762 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12}$. Hodnota vnitřní rezistivity při teplotě 70°C byla $298 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12}$ a při teplotě 90°C vyšla hodnota $109 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12}$. Normy udávají hodnotu vyšší než $100 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12}$, což všechny tři hodnoty splňují.

Po porovnání všech výsledků hodnot jednotlivých veličin, lze říci, že olej je ve vyhovujícím stavu, což znamená, že dle kapitoly 2.3.2. by se měl zvýšit počet kontrol z 1÷3 ročně na více za rok.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, CSC A KOLEKTIV, Doc. Ing. Václav. *Elektrotechnické materiály*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, Plzeň 30614, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [2] KUČEROVÁ, CSC, Doc. Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, Plzeň 30614, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] *VODIČ A IZOLANT V ELEKTRICKÉM POLI* [online]. In: [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://slidegur.com/doc/242497/vodi%C4%8D-a-izolant-v-elektrick%C3%A9m-poli>
- [4] *Elektrické izolanty* [online]. In: [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: http://www.copsu.cz/mikrop/didakticka_pomucka/elektronicke_materialy/izolanty.html
- [5] *Estery* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.komenskeho66.cz/materialy/chemie/WEB-CHEMIE9/estery.html>
- [6] *Co je glycerin?* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.glycerin.cz/>
- [7] *Vegetable oil as insulating fluid for transformers* [online]. In: April 2014 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2014/04/energize-april-14-p-37-40.pdf>. Dokument ve formátu PDF.
- [8] *Rigid foam polyurethane (PU) derived from castor oil (Ricinus communis) for thermal insulation in roof systems* [online]. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263512000696>
- [9] *5 Nontoxic Alternatives to Polyurethane* [online]. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://greenlivingideas.com/2014/07/28/5-nontoxic-alternatives-polyurethane>
- [10] ČSN EN 60422. *Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních- Návod na kontrolu a údržbu*. 1. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2007.
- [11] Diagnostika izolačních kvapalin. In: *Katedra výkonových elektrotechnických systémů: Žilinská univerzita v Žiline* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/Materi%C3%A1ly%20pre%20techniku%20VN/TVN/03%20Diagnostika/04%20Diagnostika%20izola%C4%8Dn%C3%BDch%20kvapal%C3%ADn.docx.%20Dokument%20ve%20form%C3%A1tu%20docx>.
- [12] HEŘMAN, Josef. *Přírodní izolační oleje* [online]. 1 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/prirodni-izolacni-olej>
- [13] PETRÍK, Jindřich a Petr VÁLEK. *Polychlorované bifenyly (PCB)* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://arnika.org/polychlorovane-bifenyly-pcb>
- [14] *Oil Filled: Oil-filled Capacitors* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: http://www.iequalscdvdt.com/oil_filled.html
- [15] *DERIVÁT = LÁTKA ODVOZENÁ* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.komenskeho66.cz/materialy/chemie/WEB-CHEMIE9/derivaty.html>
- [16] VLČEK, Petr. *Kapalné a plynné izolanty* [online]. In: [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://moodle.hradebni.cz/mod/page/view.php?id=3289>. Dokument ve formátu doc.
- [17] BUREŠ, Pavel. *Elektroizolační oleje* [online]. 3 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroizolacni-oleje.html>
- [18] VYUŽITÍ ROPY A ZEMNÍHO PLYNU. *Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z:

- http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyuziti_ropy.html
- [19] Adresná příloha Řádu preventivní údržby: interní dokumenty ČEPS,a.s. 2015
- [20] ORGREZ A.S. *Diagnostika izolačních olejů: Návrh směrnice*. Praha, 1996.
- [21] ŘEZANKA, BRONCOVÁ, ŠÍŠKANOVÁ, KRONĎÁK a VOSMANSKÁ. *Coloumetrie* [online]. In: VŠCHT PRAHA [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Coulometrie.pdf>. Dokument ve formátu PDF.
- [22] ANDERLOVÁ, Naděžda a Emilie EXNEROVÁ. ČSN EN 60814. *Izolační kapaliny- Olejem impregnovaný papír a lepenka- Stanovení vody automatickou coloumetrickou titrací Karl Fischer*. 1. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1999, 22 s.
- [23] BRÁZDIL, Jiří a Václav HOLUB. ČSN EN 60247. *Izolační kapaliny-Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ($\tan \delta$) a rezistivity při stejnoměrném napětí*. 1. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2005.
- [24] VAŘÁK, Jan, Jindřiška TAŠKOVÁ a Petr ŠEFERNA. *Izolační kapaliny: Měření dielektrického ztrátového činitele, relativní permitivity a vnitřní rezistivity při stejnoměrném napětí: Zkušební metodika*. ELDIAG s.r.o. - zkušební laboratoř pro zkoušení dielektrik, 2006, 6 s.
- [25] NECHLEBOVÁ, Zuzana a Jiří BRÁZDIL. ČSN EN 62021-2. *Izolační kapaliny- Stanovení čísla kyselosti- Část 2: Kolorimetrická citace*. 1. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2008, 14 s.
- [26] JERMÁŘOVÁ, Petra. *Stanovení čísla kyselosti minerálních izolačních olejů: Zkušební metodika*. ORGREZ, a.s - divize 720, 2008, 4 s.
- [27] KOŠANOVÁ, Lenka a Vladimír KUŽÍLEK. *Stanovení mezipovrchového napětí olej-voda a stanovení hustoty hustoměrem*. ORGREZ,a.s.- divize 720, 2012.
- [28] ANDERLOVÁ, Naděžda, Jiří BRÁZDIL a Emilie EXNEROVÁ. ČSN EN 60156. *Izolační kapaliny- Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu- Zkušební metoda*. 1. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1998, 13 s.
- [29] ANDERLOVÁ, Naděžda. *Metoda určení průrazného napětí kapalných izolantů při síťovém kmitočtu: Zkušební metodika*. ORGREZ, a.s - divize 720, 2000, 4 s.
- [30] KUŽÍLEK, Vladimír. *Stanovení obsahu inhibitoru DBPC v minerálním izolačním oleji: Zkušební metodika*. ORGREZ, a.s - divize 720, 2011, 4 s.

Přílohy

Příloha A – Protokol měření izolačního oleje

Provozovatel:		Výrobní číslo:	
Předmět zkoušky:	Transformátor	Výrobce:	
Zařízení:	T 401	Typ:	
Izolační kapalina:	Technol Y 3000	Rok výroby:	
Datum vystavení:	15.4.2016	Napětí:	400/121/10,5 kV
		Výkon:	350 MVA

PROTOKOL MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO OLEJE

Číslo protokolu: 190/16
 Datum odběru vzorku: 14.4.2016
 Místo odběru: nádoba transformátoru
 Barva oleje: světle žlutý
 Tepl. oleje při odběru: 40°C
 Tepl. okolí při odběru: 12°C
 Datum měření: 15.4.2016

Podmínky v laboratoři při měření:

Teplota: 22°C
 Rel. vlhkost vzduchu: 34%

Naměřené a vypočtené hodnoty:

Zkouška	Jednotka	Hodnota	Název zkoušky a předpis
Up	kV/2.5mm	80,8	průrazné napětí ČSN EN 60156
s	kV/2.5mm	5,7	směrodatná odchylka ČSN EN 60156, ZM-04
V	%	7,1	variační koeficient ČSN EN 60156, ZM-04
Qv	g/t	6,8	obsah vody ČSN EN 60814, ZM-03
ČK	mg KOH/g	0,009	číslo kyselosti ČSN EN 62021-2
tg d ₂₀	x 10 ⁻²	0,002	ztrátový činitel ČSN EN 60247
tg d ₇₀	x 10 ⁻²	0,021	
tg d ₉₀	x 10 ⁻²	0,063	
Er ₂₀	-	2,192	relativní permitivita ČSN EN 60247
Er ₇₀	-	2,141	
Er ₉₀	-	2,119	
r _{O20}	Ohm.cm.10 ¹²	3 762	vnitřní rezistivita ČSN EN 60247
r _{O70}	Ohm.cm.10 ¹²	298	
r _{O90}	Ohm.cm.10 ¹²	109	
sigma	mN/m	51	mezipovrchové napětí TP - 95/5
ρ _v	g/cm ³	0,867	hustota ČSN 656010
Qi	%	0,36	obsah inhibitoru ČSN EN 60666

Poznámka: Hodnota Up byla stanovena ze 6-ti měření (77,5; 83,6; 83,2; 72,0; 88,1; 80,3)

Použité měřicí přístroje:

BAUR DTA 100	v.č. 942920023
Aquameter KFM 1000 S	v.č. 959712009
Elektronická váha Mettler-Toledo typ PM480DR	v.č. 1114051928
Měřicí můstek Tettex typ 2821	v.č. 156255
Terraohmmeter Tettex typ 5476	v.č. 139819
Spectrophotometer Buck Scientific M500	v.č. 882