ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Oleje aplikovatelné ve výkonových transformátorech

vedoucí práce: **Ing. Jan Dončuk**
autor: **Adam Vašmucius**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Adam VAŠMUCIUS**
Osobní číslo:	**E09B0205P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Oleje aplikovatelné ve výkonových transformátorech**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte konvenční oleje využívané v transformátorech.
2. Uveďte biologicky odbouratelné oleje aplikovatelné v transformátorech.
3. Porovnejte vlastnosti biologicky odbouratelných a konvenčních olejů.
4. Uveďte základní diagnostické metody pro hodnocení olejů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **V.Mentlík a kol. - Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008.**
2. **V.Mentlík - Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006.**
3. **Elektronické informační zdroje.**
4. **Internetové databáze.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Dončuk**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

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

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis jednolitých druhů transformátorových olejů, jejich diagnostiku a použití těchto izolačních kapalin v praxi. Práce obsahuje 4 hlavní části. První část popisuje použití izolačního oleje v transformátoru jako chladicího média. V druhé části je popsáno dělení olejů a obecné informace o nich. Třetí část popisuje vlastnosti izolačních olejů a základní diagnostické metody pro hodnocení jejich důležitých parametrů. V závěrečné časti je porovnání fyzikálně-chemických vlastností jednotlivých druhů izolačních olejů používaných v praxi.

Klíčová slova

Chlazení transformátoru, minerální olej, syntetický olej, rostlinný olej, diagnostika transformátorových olejů, biologicky odbouratelné oleje.

Abstract

The presented Bachelor's Thesis aims towards the description of particular types of transformer oils and their diagnosis and practical use. The thesis has four main sections. In the first section the use of oils in a transformer as a cooling medium is desribed. In the second section the individual types of oils and their characteristics are generally described. In the third section the characteristics of insulation oils and the basic methods of diagnosis are described which lead to the evaluation of the important parameters. In the last part the physical and chemical properties of the different types of insulation oils used in practice are compared.

Key words

Cooling transformer, mineral oil, synthetic oil, vegetable oil, diagnostics of transformer oil, biodegradable transformer oil.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 6.6.2012 Jméno příjmení

……..

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Dončukovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **9**

1 OLEJOVÝ TRANSFORMÁTOR **10**

2 IZOLAČNÍ OLEJE **14**

2.1 MINERÁLNÍ OLEJE 15
2.2 SYNTETICKÉ OLEJE 16
2.3 ROSTLINNÉ OLEJE 17

3 VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH OLEJŮ **21**

4 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTOROVÝCH OLEJŮ **25**

5 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ IZOLAČNÍCH OLEJŮ **33**

ZÁVĚR **37**

POUŽITÁ LITERATURA **38**

Úvod

Tématem této bakalářské práce jsou izolační oleje použitelné ve výkonových transformátorech. Izolační olej by měl být ideální kapalný izolant, který neobsahuje volné nosiče elektrického náboje, ani další znečištěni či příměsi, a který dokáže elektricky oddělit dvě místa s různým potenciálem. V transformátorech nefunguje jen jako izolace, ale i jako chladicí médium. Izolační olej má tedy velký vliv na životnost transformátorů.

Nejrozšířenějším izolačním olejem je olej minerální. Vždy tomu tak nebylo. Začátkem 19. století se jako izolační olej používal přírodní rostlinný olej, který byl snadno dostupný. Rostlinné oleje byly vyráběny ze lnu a řepky. Tyto oleje se používaly pouze u zařízení s nízkým napětím a výkonem. Později se po objevení způsobů zpracování ropy a minerálních olejů od nich upustilo. V porovnání s minerálními oleji neměly tak dobré elektroizolační vlastnosti.

Od druhé poloviny 20. století se začínají vyvíjet syntetické izolační oleje, které již v dnešní době dosahují lepších parametrů než oleje minerální. Největším problémem těchto olejů je jejich vysoká cena, a proto se hledaly jiné alternativy. Počátkem 90. let minulého století se začaly vyvíjet izolační oleje rostlinného původu. Jejich vývoj stále probíhá, ale přesto jejich vlastnosti se již mohou měřit s ostatními druhy izolačních olejů. Jejich výhody jsou především v biologické odbouratelnosti. Další nespornou výhodou je, že jsou vyrobeny z obnovitelných zdrojů, na to je dnes kladen velký důraz, vzhledem k rostoucím cenám ropy a ropných produktů tedy i minerálních olejů. Tím se cena rostlinných olejů přibližuje cenám olejů minerálních.

1 Olejový transformátor

Transformátor je netočivý elektrický stroj, který pracuje na základě elektromagnetické indukčnosti. Jeho funkcí je měnit napětí či proud z většího na nižší a naopak se stejnou frekvencí. V elektrotechnice používáme transformátory k získání vysokého napětí k rozvodům elektrické energie na velké vzdálenosti, protože ve vedení vysokého napětí nedochází až tak k velkým ztrátám. Proto jsou velmi důležité součásti elektrické soustavy. Se zvyšujícími se energetickými nároky, se zvyšují i požadavky na spolehlivost těchto elektrických strojů. V následující kapitole jsou popsány možnosti chlazení olejového transformátoru. Životnost transformátoru je přímo závislá na chladicím systému.

Olejové transformátory patří mezi nejrozšířenější druh transformátorů. Pracovní výkony a napětí mají zde v podstatě neomezené hranice. Jejich jádro s vinutím je ponořené do nádoby, která je zalita transformátorovým olejem, který plní funkci, jak izolační, tak chladící. Nejčastěji bývá použit olej minerální. Jelikož je tento olej nebezpečný k životnímu prostředí, začíná se nahrazovat rostlinnými oleji. [1]

V normě ČSN EN 60076-2 [19] jsou ukotvena 3 základní pravidla pro chlazení, která je nutno dodržet. Průměrná roční teplota 20 °C, maximální denní průměrná teplota 30 °C a maximální špičková teplota 40 °C. Pro přehled a snadnou orientaci chladicího systému je zavedeno písemné označení, které udává druh chladícího média *(Tab. 1.1)*, způsob jeho cirkulace a předávání ztrátového tepla *(Tab. 1.2)*. [5]

Při provozu se vlivem ztrát v železném jádře a ve vinutí zahřívá transformátorový olej, proto je zapotřebí tyto části chladit. Malým transformátorům, o výkonech řádu desítek kVA, stačí hladká nádoba. Pro větší transformátory (přes 1 MVA) se plocha nádoby zvětšuje přidáním žebrování, vsazováním trubek vně nádoby, resp. použitím radiátorů, které mohou být navíc chlazeny ventilátory umístěnými pod nebo na radiátorech. Proudění oleje je ve většině případů samooběžné, pro velké transformátory se používá nuceného oběhu oleje pomocí čerpadla. Systém chlazení se ovládá automaticky nebo ručně. [2]

Vlivem tepla nastává rozklad a destilace transformátorového oleje a začnou se uvolňovat plyny. Toto je nežádoucí jev, který zachytí plynové relé (Buchholzovo relé), které se umisťuje mezi víko nádoby a konzervátor a dochází k vypnutí transformátoru. [3]

Při zahřívání oleje dochází ke zvětšení jeho objemu, buď to vlivem velkých venkovních teplot, nebo při vnitřní poruše. Z tohoto důvodu se zařazuje do jeho chladicího okruhu konzervátor (expanzní nádoba). Tato nádoba se dnes používá jen u velkých

transformátorů (přes 1 MVA) a u menších transformátorů expanzi oleje umožní pružná dilatace nádoby, zejména jejích chladících žeber. [3]

Tab. 1.1 Značky pro chladící média [1]

Druh chladícího média	Značka
Vzduch	A
Plyn	G
Voda	W
Olej (bod vzplanutí do 300 °C)	O
Jiná kapalina (bod vzplanutí nad 300 °C)	K
Nehořlavá kapalina	L
Pevný izolant	S

Tab. 1.2 Značky pro způsob oběhu [5]

Způsob oběhu chladiva	Značka
Přirozený	N
Nucený (s ventilátorem nebo čerpadlem)	F
Nucený s usměrněným prouděním	D

Příklady některých způsobů chlazení:

1. Systém ONAN
   - přirozený průtok oleje přes radiátory
   - radiátory – u malých transformátorů jsou součástí, u velkých samostatně
   - systém chlazení je ovládán automaticky nebo ručně

2. Systém ONAF
   - přirozený průtok oleje přes radiátory a umělé proudění vzduchu pomocí ventilátorů
   - zintenzivnění chlazení
   - systém chlazení je ovládán automaticky nebo ručně

3. Systém OFAF znázorněn na obrázku *Obr. 1.1*
   - umělé proudění oleje přes radiátory a umělé proudění vzduchu pomocí ventilátorů
   - používají se olejovo-vzduchové chladiče
   - olej je poháněn olejovým čerpadlem
   - motory čerpadel a ventilátorů jsou chráněny proti zkratu a nadproudu

4. Komínový efekt
   - chlazení přirozenou ventilací
   - nejjednodušší a nejekonomičtější způsob, maximálně spolehlivý žádné další zařízení
   - větrací otvory musí mít dostatečný průřez (a samozřejmě musí být volné, nezanesené nečistotami)
   - mezi středem transformátoru a otvorem pro výstup vzduchu musí být dostatečný výškový rozdíl
   - otvory pro vstup vzduchu se dělají obvykle u podlahy. Vždy však musí být níže, než je střed transformátoru (jeho vinutí).
   - nezbytný průřez větracích otvorů a rozdíl výšek závisí na množství tepla, které je třeba odvádět, tedy na skutečných ztrátách transformátoru [13]

Obr. 1.1 Výkonový transformátor chlazený systémem OFAF (převzato z [10])

Olejové transformátory využívají především rozvodné podniky (ČEZ Distribuce a.s., E. ON Distribuce a.s.), které téměř jiné druhy transformátorů nenakupují a dále také zákazníci z výrobní sféry. Olejové transformátory jsou výhodnější oproti suchým zejména při velkých rozdílech teplot, provozních napětí vyšších než 35 kV a výkonech přesahujících 20 MVA. Jejich provoz a pořizovací cena je však vyšší, údržba složitější a nákladnější oproti suchým transformátorům. [4]

2 Izolační oleje

Jsou to kapaliny, které dobře vyplňují prostor, dostávají se do tuhých pórů izolantů a odvádějí přebytečné teplo. Proto je vhodné použít oleje o nízké viskozitě. Dále by měly vykazovat dobrou tepelnou a oxidační stabilitu a v neposlední řadě jsou podstatné jejich elektroizolační vlastnosti, aby zajišťovaly spolehlivý provoz transformátoru. Tato kapitola je zaměřena na tři základní druhy izolačních olejů. Jsou zde popsány jejich typické vlastnosti složení a původ. Následně jsou zde izolační oleje rozděleny do pěti skupin [11].

Izolační oleje-rozdělení:

1. Podle původu
   - přírodní minerální oleje na bázi ropy
   - přírodní rostlinné oleje
   - syntetické kapaliny

2. Podle charakteru většiny molekul
   - nepolární kapaliny
   - polární kapaliny

3. Podle použití
   - kapaliny pro transformátory a vypínače
   - kapaliny pro impregnaci kabelové izolace
   - kapaliny pro kondenzátory a impregnaci kondenzátorů
   - kapaliny pro chlazení elektrických strojů (nemusí to být vždy izolanty)

4. Podle trvalé teplotní odolnosti
   - do 90 °C – minerální oleje
   - do 130 °C – syntetické kapaliny
   - do 200 °C – některé druhy fluorovaných uhlovodíků a silikonové kapaliny

5. Podle hořlavosti
   - hořlavé
   - nehořlavé

2.1 Minerální oleje

Minerální oleje tvoří stále velkou skupinu kapalných izolantů, které se v současné době používají. Získávají se z ropy její destilací. Dále se rafinují, aby se odstranily některé nežádoucí látky obsahující především kyslík. Rafinace ropy je nejdéle známou metodou pro získávání olejů z ropy. Cílem rafinace je rozdělit ropu na jednotlivé složky podle délky řetězců uhlovodíků. Jednou frakcí jsou právě minerální oleje. Postup rafinace je následující.

Destilací se oddělí jednotlivé složky ropy v závislosti na jejich rozdílném vypařovaní (za atmosférického tlaku) při různých teplotách. Po zahřátí se jednotlivé složky odpařují a při různých teplotách kondenzují. Destilací se z ropy získají frakce benzín, nafta, lehký topný olej. Další složky se získávají obtížně a zbytek, který se neodpařil, je následně podroben vakuové destilaci. [12]

Princip vakuové destilace je shodný s destilací. Vakuová destilace probíhá za sníženého tlaku, tudíž se začnou vypařovat i jiné složky než při tlaku atmosférickém. Vakuovou destilací se z ropy získají především oleje různé viskozity.

V rámci rafinování jsou z olejů odstraněny nežádoucí příměsi**,** a tak dojde ke zlepšení základních vlastností získaných olejů**.** [12]

Další nečistoty se odstraňují aktivní hlinkou a jejím následným odfiltrováním. Používají se i další metody čištění, např. ochlazení s vykrystalizováním parafinů, odplynění aj.

Z chemického hlediska jsou minerální oleje směsí uhlovodíků**.** Strukturu uhlovodíků ovlivňuje především kvalita a druh ropy. Vlastnosti oleje určuje jeho chemické složení. Pokud olej například obsahuje přebytek parafinických či benzenových molekul, tak se viskozita oleje může zvyšovat nebo snižovat. Parafinické oleje disponují menšími ztrátami.

Transformátorový olej neplní funkci pouze izolační, ale slouží rovněž jako chladicí médium. Nejdůležitější roli hraje viskozita a její teplotní závislost**.** Při jakýchkoliv teplotních změnách nesmí její hodnota spadnout pod určitou mez. Pro minerální oleje je typické rychlé stárnutí, vyžadujeme především stabilitu. Stárnutí se dá potlačit různými přísadami (antioxidanty)**.** [11]

Hustota minerálních olejů se pohybuje v rozmezí 900 až 920 $kg \cdot m^{-3}$, bod vzplanutí je 130 až 135 °C, bod tuhnutí je přibližně -40 °C**.** [15]

Minerální oleje jsou rozděleny do dvou skupin podle chemického složení a způsobu výroby, toto dělení je uvedeno níže. [15]

Podle chemického složeni se minerální oleje dělí:

- oleje parafinické – vyznačuji se plochou viskózní křivkou a používají se zejména pro transformátory
- oleje naftenické – mají strmou viskózní křivku a používají se v kabelové technice
- oleje složené z obou směsí
- oleje olefinické – obecný typ olejů z bodů 1 a 2, tvořenými dvojnými vazbami

Podle způsobu výroby a požadovaných vlastnosti dvě základní skupiny:

- Inhibované
- Neinhibované

2.2 Syntetické oleje

Hlavním důvodem používání syntetických olejů jsou jejich výborné fyzikálně-chemické vlastnosti, které jsou lepší než u olejů minerálních. Mezi tyto vlastnosti patří nehořlavost, odolnost vůči vysokým teplotám a vysoká oxidační stabilita. Velkou nevýhodou je vysoká cena.

Produkty chemických reakcí jsou základem pro výrobu syntetických olejů, kdy se z nízkomolekulárních látek vytváří velké komplexní molekuly. Na rozdíl od ropných olejů, které mají komplexní směs uhlovodíků, lze vlastnosti syntetických kapalin přesně definovat a zajistit standardní kvalitu. [12] Druhů syntetických kapalin je mnoho, zde je uvedeno několik základních skupin.

Polybuteny, které vznikají polymerizací nenasycených uhlovodíků, jsou směsí polymerů butenu a jejich molekuly jsou nepolární. Mají výborné elektrické a chemické vlastnosti. Vynikají vysokou odolností vůči vyšším teplotám a oxidaci. [14]

Silikonové kapaliny jsou bezbarvé kapaliny, které mají vynikající teplotně viskózní křivku, velmi nízké body tuhnutí, malý odpor, vysokou tepelnou stabilitu a vysoký bod vzplanutí. V ropných olejích zvyšují bod vzplanutí a potlačují pěnění. Jsou zdravotně nezávadné, nezpůsobují koroze kovů a nejsou agresivní vůči organickým izolantům. [12]

Fluorované uhlovodíky jsou deriváty uhlovodíků, aminů a esterů, ve kterých jsou atomy vodíku nahrazeny atomy fluoru. Jsou chemicky velmi stabilní a nevýbušné. Mají vysokou teplotu rozkladu přes 300 °C a dobré elektrické vlastnosti. Nevýhodou je, že se snadno vypařují a tyto plyny jsou zdravotně závadné. Nejsou mísitelné se silikony a uhlovodíkovými oleji. [14]

Organické estery jsou vyráběny pomocí chemické syntézy. Mají nízké hodnoty ztrátového činitele, vysokou odolnost vůči plynům a dobrou teplotní stabilitu. Jsou zdravotně nezávadné. Používají se jako náhrada za minerální oleje. [14]

Chlorované uhlovodíky. Dříve se používaly jejich deriváty benzenu a bifenylu. Nejznámějším zástupcem je pentachlorbifenyl. Je organickou sloučeninou a obsahuje pět atomů chloru v každé molekule, u nás známý jako Delor. Pentachlorbifenyl je polární dielektrikum s relativní permitivitou 4,5 až 5 a s elektrickou pevnosti 110 kV cm^{-1}. Používání chlorovaných uhlovodíků je od roku 2010 zcela zakázáno z důvodu nepříznivého dopadu na zdraví a životní prostředí. [15]

2.3 Rostlinné oleje

Přestože jsou minerální oleje nejčastěji používanými izolačními kapalinami v transformátorech. Technické vlastnosti minerálních olejů byly optimalizovány během několika desítek let a jejich technicko-ekonomické řešení je zatím nejlepší. Je ale třeba řešit jejich vliv na životní prostředí. V rámci hledání ekologických produktů byly jako alternativa za minerální oleje zvoleny rostlinné oleje. Některé rostlinné oleje splňují technické požadavky běžných izolačních kapalin. Tyto vlastnosti budou popsány v následujícím odstavci. Jejich vysoká biologická odbouratelnost a netoxicita jsou dalšími vlastnostmi, které jsou zajímavé pro vývoj nových ekologicky nezávadných izolačních kapalin

Rostlinné oleje se v podstatě sestávají z triglyceridů, přirozeně syntetizovaných esterifikací tri-alkoholu, tzv. glycerolu, se třemi mastnými kyselinami. Tyto mastné kyseliny jsou složeny z uhlovodíkových řetězců ukončených karboxylovým uhlíkem. Tyto molekuly mají sudý počet atomů uhlíku (obvykle od 8 do 22 v triglyceridech) a řetězec může být převážně nasycený nebo mono-,di- a tri-nenasycený. Kyselina olejová je příklad nasycených mastných kyselin (řepkový olej až z 90 %, slunečnicový olej, sojový olej). Její zkrácený vzorec je C18:0, kde první dvě čísla odpovídají počtu atomů uhlíku vázaných v molekule. Oleje se získávají ze semen různých plodin, které mohou být charakterizovány relativním množstvím mastných kyselin, jak je uvedeno v *Tab.3.1.* Přidáním dalších sloučenin v malém množství do rostlinných olejů ovlivní jejich konzistenci, barvu a zápach. Rafinace může odstranit tyto molekuly v závislosti na požadovaných vlastnostech. [26]

Tab. 3.1. Typické vzorce mastných kyselin v % převzato z [26]

Mastné kyseliny	**Ricínový olej**	**Řepkový olej**	**Slunečnicový olej**
C16:0	0,95	4.29	5,77
C18:0	1.00	1,57	3,97
C18:1	2,29	55,7	27,2
C18:1(OH)	90,0	0,00	0,00
C18:2	3,48	19,3	59,2
C18:3	0.35	10,2	0,23
C20:0	0,00	0,47	0,24
C20:1	0,22	1,20	0,13
C22:0	0,00	0,64	1,44
C22:1	0,00	0,23	0,00

Některé rostlinné oleje obsahují vysoké procento nenasycených mastných kyselin, což způsobuje nižší viskozitu a lepší nízkoteplotní vlastnosti. Jiné mají vyšší procento nasycených mastných kyselin, které zlepšují oxidační stabilitu. Je třeba zvolit optimální rovnováhu mezi oběma typy mastných kyselin. Některé chemické deriváty těchto olejů připravené z rafinovaných olejů s různými alkoholy jako metanol, iso-propanol atd. reakcí odloučí mastné kyseliny spojené z jednotlivých složek tri-glyceridu a vytváří tři samostatné estery. To zlepší reologii[1] kapaliny. [26]

Nezpracované rostlinné oleje a jejich estery vykazují hodnoty průrazného napětí až 70 kV a tudíž dosahují hodnot minerálních a syntetických olejů. Velikost průrazného napětí primárně závisí na obsahu vody, proto je důležité, aby nádoba transformátoru byla hermeticky uzavřená. [26]

[1] Reologie se zabývá obecnými mechanickými vlastnostmi látek, vztahy mezi napětím, deformacemi a rychlostí deformace a z toho u kapalin vyplývajícími dalšími hydrodynamickými vztahy. Reologie je obor mechaniky zabývající se deformací a tokem látek vlivem napětí, která na něj působí.

Tab. 3.2 Vlastnosti rostlinných olejů ze semen a některých jejich esterů převzato z [26]

	Průrazné napětí (kV)	Bod tuhnutí (°C)	Viskozita při 40 °C ($mm^2 \cdot s^{-1}$)
Limitní hodnoty	> 70*	< -40	< 12
Ricínový olej	86,7±3,1	-27	261,5
Metylové	74,1±5,9	-22	14,4
Iso-propanolové	96,0±5,2	-35	16,0
X-alkoholové estery	70,0±13,6	< -38	11,0
Rostlinný olej	58,4±5,1	-15	41,2
Metylové	79,6±8,2	-8	11,1
Iso-propanové	82,9±6,9	-22	12,0
Řepkový olej	97,1±3,7	-23	41,1
Metylové	67,4±7,8	-16	7,2
Iso-propanolové	85,0±9,8	-24	5,2
X-alkoholové estery	89,5±4,9	< -38	8,1
*Po laboratorním zpracování (filtrace pomocí skleněných fritů při 60 °C ve vakuu)			

Tabulka 3.2 ukazuje, že hodnoty bodu tuhnutí u nezpracovaných olejů překračují předepsané hodnoty. Po esterifikaci se viskozita olejů sníží pod stanovenou hodnotu, která je 35 $mm^2 \cdot s^{-1}$. Tato hodnota je předepsána pro syntetické organické estery. Spíše se ale blíží hodnotě 12 $mm^2 \cdot s^{-1}$, která je předepsána pro oleje minerální. To je způsobeno tím, že esterifikací oddělíme velké triglyceridy do menších molekul, a tím zlepšíme reologii oleje. [26]

Bod tuhnutí je sice méně ovlivňován molekulární strukturou tekutiny, ale čím je větší podíl alkoholu, tím je nižší bod tuhnutí. [27]

Tepelné vlastnosti rostlinných olejů se jeví jako rovnocenné nebo i lepší než u olejů minerálních. Díky lepšímu tepelnému přenosu oleje oproti pomalejšímu oběhu, lze předpokládat, že tepelná vodivost a měrné teplo by mohlo mírně kompenzovat příliš vysoký bod tuhnutí a nízkoteplotní viskozitu. Koeficient teplotní roztažnosti mají rostlinné oleje nejnižší, proto lze bez problémů použít stávající nádoby transformátorů. [26]

Bod vzplanutí a vznícení je vyšší než nejméně hořlavé dielektrické kapaliny, které jsou dnes k dispozici. Rostlinné oleje jsou zajímavá alternativa izolačních olejů s PCB látkami a jinými halogenovými dielektrickými tekutinami používaných v transformátorech. Oxidace rostlinných olejů je jejich největší nevýhodou, jejich stabilita je mnohem nižší, než je tomu u olejů na ropné bázi. [27]

Oxidace a hydrolýza jsou hlavní mechanismy stárnutí. Jestliže chceme mít rostlinné oleje více stabilní, je potřeba přidat inhibitory k základní tekutině a zabránit přístupu vzduchu k oleji, tedy použitím v hermeticky uzavřených transformátorech.

Inhibitory musí být výhradně z potravinářského prostředí, aby byla zachována biologická odbouratelnost. Výsledkem testu toxicity je nulová úmrtnost za standardní zkušební dobu 96 hodin na 1000mg/kg. [27]

3 Vlastnosti izolačních olejů

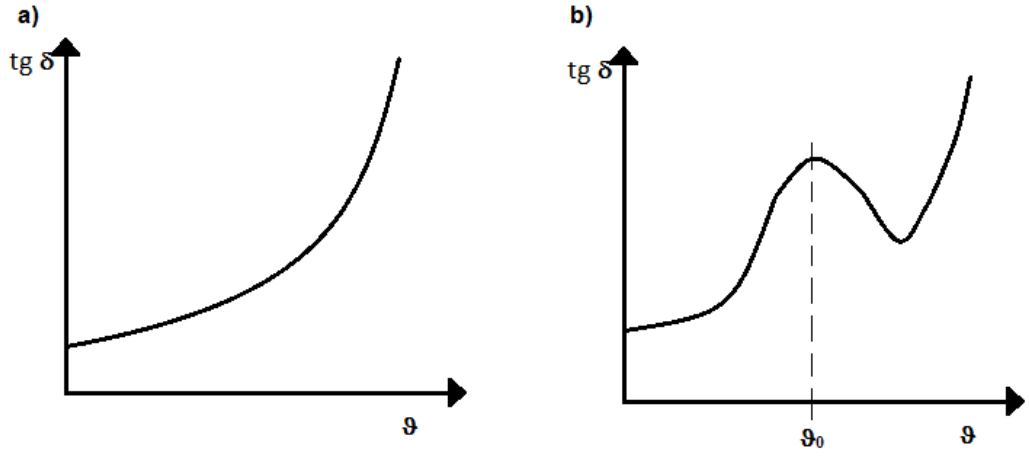
Izolační oleje plní především funkci chladícího a izolačního média, dále usnadňují zhášení případného výboje a odlehčují zatížení pevných izolantů. Tyto funkce by nemohly plnit, pokud by jejich jednotlivé vlastnosti nesplňovaly odborné normy a předpisy. V následující kapitole jsou některé důležité vlastnosti blíže popisovány.

Průrazného napětí

Průrazné napětí souvisí s elektrickým výbojem je nepředvídatelné. Jedná se především o přítomnost a druh příměsí, rozložení elektrického pole, druh napětí, tlak, teplota atd. Právě složitost tohoto jevu zabraňuje jednoznačnému utvoření teorie přeskoku (průrazu). Přesto se elektrické výboje vyznačují jistými jevy, například mechanismus přeskoku může být, jak elektrický, tak tepelný. Výboj se tvoří zejména v místech se zvýšenou koncentrací především pevných nečistot nebo plynových bublinek. Proto je potřeba odstranit co nejvíce nečistot. Z tohoto důvodu se provádí destilace kapaliny, filtrace, odplynění, odstraňuje se vlhkost apod. K přeskoku dochází při vyšším napětí. Roste počet volných nosičů náboje a izolant ztrácí svoji funkci. Přeskok izolantu doprovází vždy nekontrolovatelné zvýšení elektrické vodivosti.

Ztrátový činitel

Ztrátový činitel neboli ztrátový úhel dielektrika je veličina charakterizující izolant z hlediska jeho dielektrických ztrát. Indikuje přítomnost pevných částic, rozpuštěných polárních a iontových složek v oleji. Závisí na teplotě, frekvenci a intenzitě elektrického pole. V čistých nepolárních kapalných izolantech se nachází pouze elektronová polarizace. Ztráty jsou způsobeny pouze elektrickou vodivostí těchto izolantů. Dielektrické ztráty jsou malé. Teplotní závislost ztrátového činitele odpovídá průběhu teplotní závislosti měrné elektrické vodivosti, které je zobrazeno na *obr. 2.1. a)* [17]



Obr. 2.1. Teplotní charakteristika tgδ nepolárních(a) a polárních(b) izolantů [17]

V polárních kapalných izolantech jsou kromě vodivostních ztrát i výrazné ztráty polarizační. U těchto látek jsou dielektrické ztráty vetší než u nepolárních, je to způsobeno hlavně vyššími vodivostními ztrátami. Na *obr 2.1. b)* je zobrazena teplotní závislost ztrátového činitele. Výsledná teplotní charakteristika vzniká součtem vodivostních a polarizačních ztrát. Teplotní závislost vykazuje maximum, to souvisí s viskozitou. S klesající teplotou roste viskozita. Při zvyšování teploty nastane stav, kdy se dipóly nemohou již pohybovat díky vysoké viskozitě prostředí. Tomuto stavu odpovídá maximum ztracené energie. Při stále se zvyšující teplotě klesá viskozita a tím se i sníží ztrátový činitel. [8]

Vnitřní rezistivita

Velikost rezistivity závisí na obsahu vody, obsahu nečistot, teplotě a stupni oxidace zkoušeného oleje. Umožňuje detekci produktů provozního stárnutí a absorbované vody. Převrácenou hodnotou vnitřní rezistivity je elektrická vodivost. Elektrická vodivost se zvyšuje s rostoucí teplotou, jelikož se snižuje viskozita a tím i rezistivita. Pokud hodnota rezistivity je při 90 °C v normě, ale při okolní teplotě nikoliv, je zřejmé, že se v oleji nachází voda a jiné cizí látky. [9]

Je to ovšem jenom doplňující veličina, která usnadňuje v některých případech posouzení ztrátového činitele. Reaguje na přítomnost cizích složek vodivostního charakteru v oleji, tedy i vody. Vnitřní rezistivita izolantů (ρ_v) může být v rozmezí $\rho_v = 10^7$ až $10^{19}\ \Omega\cdot m$. [9]

Barva

Barva je vyjádření jakosti kapalného izolantu a přítomnosti cizích látek. Je prvním kritériem, kterým lze odhadnout stav izolačního oleje po jeho odběru z transformátoru. Stanovuje se orientačně porovnáním vzorku s barevnými standardy. Čím je barva oleje světlejší, tím je olej jakostnější. V provozu izolační oleje tmavnou. Změnou barvy lze diagnostikovat první stupeň oxidačního stárnutí. [8]

Viskozita

Viskozita je fyzikální veličina udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Je to veličina, která charakterizuje vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mezi částicemi mají větší viskozitu, větší viskozita zpomaluje pohyb kapaliny nebo těles v kapalině. Při volbě oleje do transformátoru je výhodnější kapalina s nižší viskozitou, kde se snáze dostane do pórů izolace a lépe odvádí teplo, tudíž lépe chladí vinutí. [25]

Bod vzplanutí

Je jakostní parametr určující kvalitu nových i provozovaných olejů. Říká nám, do jaké teploty je olej bezpečný a nevzniká tak riziko požáru. Bod vzplanutí je určen teplotou, při které se vytvoří směs par z oleje a vzduchu, která se po přiložení plamínku vznítí a okamžitě zhasne. [9]

Bod tuhnutí

Bod tuhnutí se určuje proto, aby se zjistilo, jak se bude izolační olej chovat při nízkých teplotách. Toto je důležité při spouštění transformátorů při extrémně nízkých teplotách. Teplota tuhnutí udává teplotu, při níž olej tuhne a zvyšuje se jeho viskozita. Zároveň dochází k vylučování a růstu krystalů. Teplota přeměny jednoho skupenství ve druhé je závislá na chemickém složení a na čistotě oleje. U chemicky čistých látek s nízkou molekulovou hmotností je přechod ostrý. U technických výrobků, které jsou směsí látek, dochází k přeměně v intervalu několika stupňů. [8]

Číslo kyselosti

Všechny jakostní předpisy pro nové izolační oleje limitují přítomnost kyselých látek. Číslo kyselosti udává množství KOH, které je potřeba v nevodném alkoholickém prostředí k neutralizaci organických a anorganických kysele reagujících složek v 1 g oleje. Kyseliny vznikající oxidačními pochody způsobují korozi kovů a mají degradační účinky na izolanty, především na mechanickou pevnost celulózových izolantů. Konečnými produkty oxidace jsou nerozpustné kaly a usazeniny, které zhoršují odvod tepla z aktivních částí stroje. U nových transformátorových olejů číslo kyselosti indikuje stupeň rafinace oleje, případně upozorňuje na přítomnost organických kyselin zbylých z rafinace. U použitých olejů se stárnutím oleje zvyšuje počet kyselých látek. Podle jejich obsahu můžeme určit stupeň zestárnutí oleje. [18]

Oxidační stabilita

Oxidace je reakce mezi kyslíkem a molekulami oleje, většinou mezi kyslíkem a uhlovodíky. Kyslík je při oxidaci zabudován do molekul oleje a mění tím jeho vlastnosti. Oxidace oleje je podporována teplotou. Čím je teplota oleje větší, tím rychleji olej oxiduje. Zvýšení teploty o 10° C rovná se přibližně zdvojnásobení rychlosti oxidace. Protože oxidace je podporována zvýšenou teplotou, mluví se často o termooxidačním stárnutí oleje, při němž olej kromě oxidace podléhá současně i určitým termickým změnám. Oxidační stabilitu olejů určujeme, aby se zjistilo chování oleje po dlouhodobém namáhání a jako porovnání mezi dalšími izolačními oleji. [7]

Obsah vody

Voda se v olejové náplni objevuje vlivem nedokonalé izolace nádoby transformátoru od okolní atmosféry, vzniká také jako produkt oxidačního stárnutí celulózy a je také vedlejším produktem při polykondenzačních reakcích. Voda v emulgované i ve vázané formě podstatně snižuje hodnotu průrazného napětí a urychluje degradaci pevných izolací. Převyšuje-li obsah vody v izolačním oleji limitní hodnoty, je třeba provést vysušení olejové náplně i izolačního systému transformátoru. [18]

Obsah PCB látek

Polychlorované bifenyly jsou látky, které obsahují na bifenylovém jádře 1-10 atomů chlóru. Jsou to izomery, které se liší počtem či polohou atomů chlóru. Jsou to bezbarvé nebo žlutě zbarvené netěkavé kapaliny. Vlastnosti jsou ovlivněny především obsahem chloru a stupněm chlorace. Mezi jejich výborné vlastností patří jejich teplotní stálost, odolnost vůči oxidaci a kyselinám, vysoký bod varu (310-390 °C). Jsou téměř nerozpustné ve vodě, ale naopak dobře rozpustné v organických rozpouštědlech a tucích. Jsou velmi nebezpečné pro živé organismy, jelikož se kumulují v tukových tkáních. [21]

Na území bývalého Československa byl jediným výrobcem izolačních olejů s PCB látkami chemický kombinát Chemko Strážské, jeho výrobek měl označení DELOR150/80. Od konce 60. let, kdy byl zjištěn jejich negativní vliv na životní prostředí, byla výroba PCB postupně celosvětově omezována. Odhaduje se však, že celkem bylo vyrobeno ve světě přes 1,2 milionu tun polychlorovaných bifenylů. Chemko Strážské vyrobil těchto látek mezi lety 1959 a 1984 přes 21 500 tun. V současné době se tyto kapaliny v ČR nevyrábějí a je zakázáno je dovážet. Do roku 2010 měly být látky PCB a zařízení s PCB odstraněny. [20]

4 Diagnostika transformátorových olejů

Transformátory jsou velice jednoduchá a spolehlivá zařízení. V energetické soustavě jsou velmi důležitými prvky. Vlivem provozních podmínek dochází ke stárnutí jednotlivých částí transformátoru**,** a tím ke změnám jeho důležitých elektrických a mechanických vlastností. K zjištění stupně zestárnutí jednotlivých částí transformátorů přispívá velkou měrou obor elektrotechnologické diagnostiky. Hlavním úkolem diagnostiky je zjistit, zda zkoušený stroj vyhovuje daným předpisům a normám. Tato kapitola je zaměřena na diagnostiku izolačních kapalin. Na izolační olej je nutné aplikovat celý soubor metod, jelikož každá metoda zjišťuje jinou vlastnost oleje. To nám umožní získat komplexní obraz o diagnostikovaném oleji.

Důležitým stupněm diagnostiky je odběr vzorků oleje, jejich uchovávaní a transport do laboratoře. Po nedodržení správných postupů může dojít ke zkreslení výsledků a tím i k nesprávnému určení jakosti diagnostikovaného oleje. Může dojít k navlhnutí, odplynění nebo naopak nasycení vzdušnými plyny a tím k fyzikálně-chemickým změnám. Základní způsoby odběru vzorků spočívají v odběru při styku kapaliny s okolní atmosférou nebo bez styku s atmosférou. [8]

Vzorkovnice má objem 250 ml a je zakončená uzavíratelnými olejivzdornými hadicemi. Hadice umožňují při chladnutí oleje teplotní dilatace. Vzorkovnice se před samotným odběrem propláchne odebíraným olejem. Odběr izolačního oleje bez styku s ovzduším probíhá tak, že se na výpustní ventil nasadí olejivzdorná hadice a nechá se odtéct cca 3 litry oleje (usazeniny, kaly). Poté se odebere požadovaný vzorek oleje, ve kterém nesmí být žádná vzduchová bublina. Kromě vzorkovnic se pro odběr oleje mohou použít i injekční stříkačky. [25]

Při odběru oleje za přístupu vzduchu do skleněných zabroušených lahví, musí být dodrženy tyto zásady. Odběr nelze provádět za sněžení, mlhy, deště a v případě, že relativní vlhkost vzduchu překročí 75 %. Odběr se provádí do lahví**,** o objemu jeden litr z hnědého skla (omezují vliv slunečního záření), s úzkým hrdlem a zabroušenou plnou zátkou. Vzorky se odebírají opět až po odpuštění třech litrů oleje. Poté se hadice zasune až na dno nádoby a nechají se přetéci další asi 3 litry oleje. Po vyjmutí hadice se opláchne olejem zábrus skleněné zátky. Zátka se vpustí do hrdla lahve. U zátky by neměla být vzduchová bublina. [25]

Po odebrání vzorků následuje jejich přeprava do laboratoře. Vzorkovnice a láhve je třeba pečlivě označit a vyplnit údaje o stoji, ze kterého byl vzorek odebrán. Nádoby se nesmí

vystavovat přímému slunečnímu záření a prudkým změnám teplot. Zpracování vzorků se doporučuje vyhodnotit do pěti dnů, ale stanovení vody v oleji nejpozději do tří dnů. [8]

Během provozu olejového transformátoru dochází vlivem teploty, elektrického pole, nečistot a jiných faktorů ke stárnutí olejové náplně. Od počátku manipulace s oleji je nutné dbát na jejich ochranu před znečištěním, vysokou teplotou a stykem s atmosférou. Použité oleje se v provozu buď regenerují nebo mění za nové.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní metody měření jakostních parametrů izolačních olejů.

Určení barvy kapalných izolantů

Změnou barvy izolační kapaliny lze diagnostikovat první stupeň oxidačního stárnutí. Barva oleje se nejprůkazněji mění v období, kdy polymerací a polykondenzací vznikají látky, které jsou v oleji rozpustné. Pro stanovení barvy se používají dva způsoby. První způsob je subjektivní, který je založen na porovnávání odebraného vzorku oleje s barevnými etalony. Druhý způsob je objektivní, který za pomoci měřicího přístroje porovná nejen barvu oleje, ale určí i odstín. [25]

Měření se provádí například za pomoci Lovibondova tintometru. Vzorky oleje v kyvetě se porovnávají se standardními skly (červená, modrá, žlutá). Správným nastavením těchto skel se sestaví požadovaná barva. Dalším přístrojem je kolorimetr Union. Vzorek ve válcovité skleněné nádobce se porovnává s 12 barevnými skly. Dubiscův kolorimetr umožňuje porovnávat najednou dvě kapaliny. [8]

Měření viskozity

Měření viskozity je velmi důležité, protože viskozita závisí na teplotě a ovlivňuje chladící funkci oleje v transformátoru. Pro stanovení viskozity lze použít tyto viskozimetry. [8]

Kapilární viskozimetr využívá dobu průtoku oleje kapilárou a rozdíl tlaků mezi konci kapiláry. Z diferenčního tlaku na kapiláře se určí viskozita izolačního oleje.

Stokesův viskozimetr je založen na principu pádu kuličky v měrné válcové nádobce naplněné izolačním olejem. Měří se doba pádu kuličky na dráze 100 mm.

Rotační viskozimetr využívá principu překonání počátečního odporu rotoru ve tvaru válce ve zkoumaném izolačním oleji. Měří se síla, kterou rotor potřebuje na překonání odporu oleje proti otáčení.

Měření bodu tuhnutí

Toto měření se provádí ve zkumavce, která je postupně ochlazována CO_2. Odebraný vzorek oleje se nejprve zahřeje na 50 °C. Poté se nalije do zkumavky chlazenou CO_2 až teplota oleje klesne na 32 °C, nakloní se zkumavka. Pokud olej neteče, znamená to, že olej tuhne nad 30 °C, pokud ale olej teče, chladí se dál. Při každém poklesu teploty o 2 °C se zkouší, zda olej teče. Jestliže neteče, označí se tato teplota jako bod tuhnutí. [8]

Měření bodu vzplanutí

Bod vzplanutí se měří Pensky-Martensovým přístrojem. Určuje se teplota, při níž se vznítí na krátký okamžik olejové páry smíchané se vzduchem po přiložení rozžhaveného tělíska ke hladině oleje. Dojde k slabé explozi doprovázené slabým zábleskem. V tuto chvíli se zaznamená teplota a tlak. U kapalných izolantů by měla být hodnota bodu vzplanutí vyšší než 150 °C a vzorek by neměl po měření obsahovat vodu. [8]

Určení obsahu vody v oleji

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

Obsah vody lze také zjišťovat na principu reakce hydridu vápníku s vodou za vzniku vodíku, který je úměrný obsahu vlhkosti. Rozpustnost vody v izolačním oleji se uvádí v mg/kg. [22]

Mezipovrchové napětí

Povrchové napětí lze popsat jako sílu působící na jednotku délky v povrchu kolmo k této délce a tangenciálně k ploše povrchu. Mezipovrchové napětí je možné měřit na rozhraní vzduch-kapalina, nebo voda-kapalina.

Při počátku stárnutí izolačního oleje vznikají jako produkt stárnutí v oleji rozpustné organické látky. Mezipovrchové napětí citlivě reaguje na vznik těchto látek. Měření mezipovrchového napětí se hodí především pro nízké koncentrace polárních nečistot, které vznikají v počátku stárnutí. Často se používá metody, kdy se měří síla potřebná k odtržení platinového prstence nebo tenké skleněné destičky z oleje. Měření se provádí na hranicí fází voda-olej nebo vzduch-olej. Také se používá tzv. kapková metoda, kdy se mezipovrchové napětí vypočte z měření hmotnosti objemu vody vyteklé z kapiláry do vzduchu a měřeného

oleje. Voda i olej musí mít stejnou teplotu. Měření probíhá tak, že do kolorimetrického válečku se nalije zhruba 100 ml oleje, poté se váleček ponoří přibližně 1 cm pod hladinu olej a změří se objem (hmotnost) minimálně deseti kapek vody vyteklých do oleje. Měření se provádí minimálně dvakrát, a pak se podle vztahu (4.1) vypočítá aritmetický průměr ze všech měření. [25]

$$\sigma_{vo/o1} = V_{vo/o1}\,(\rho_{vo} - \rho_{o1})\,\frac{\sigma_{vo/vz}}{\rho_{vo} V_{vo/vz}} \tag{4.1}$$

kde $\sigma_{vo/o1}$ je povrchové napětí na rozhraní voda-olej [N·m^{-1}],

$\sigma_{vo/vz}$ je povrchové napětí vody ve vzduchu [N·m^{-1}],

$V_{vo/o1}$ je objem jedné kapky vody vyteklé do měřeného izolačního oleje [m^3],

$V_{vo/vz}$ je objem jedné kapky vody vyteklé do vzduchu v [m^3],

ρ_{vo} je hustota vody při měření (≈100 kg·m^{-3}),

ρ_{o1} je hustota měřeného izolačního oleje v [kg·m^{-3}].

Měření čísla kyselosti

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

Potenciometrická metoda určí číslo kyselosti pomocí automatického pH titrátoru. Číslo kyselosti je podle této metody množství báze vyjádřené v miligramech hydroxidu draselného na jeden gram vzorku, které je potřeba k zneutralizování testovaného oleje ve specifickém roztoku, který se titruje do hodnoty pH 11,5. [23]

Titrací kyselých sloučenin alkoholickým roztokem hydroxidu draselného se stanoví číslo kyselosti na alkalickou modř 6B. Nejprve je nutné stanovit tzv. faktor 0,1 M KOH. Ten se stanoví tak, že do směsi etanolu a toluenu v poměru 1:2 se přidává alkalická modř, dokud se kapalina nezbarví do světle modré. Poté se přidá jedna kapka 0,1 M HCL ke zcitlivění indikátoru. Následně se přidá alkoholový roztok KOH do počínajícího červeného zbarvení. Tím se roztok zneutralizuje a přidá se 0,01-0,011 g kyseliny benzoové, po jejím rozpuštění se opět titruje alkoholovým roztokem KOH, jehož faktor se má určit až do počínajícího červeného zbarvení. Faktor 0,1 M KOH v mg KOH se vypočte podle vzorce (4.2). [24]

$$f = \frac{a \cdot 1000}{b \cdot 122{,}12 \cdot 0{,}1} \tag{4.2}$$

Kde F je faktor 0,1 M KOH,

a je navážka kyseliny benzoové v gramech,

b je spotřeba 0,1 M KOH v cm^3,

122,12 je ekvivalentní hmotnost kyseliny benzoové.

Po stanovení faktoru f se smíchá 60 ml toluenu, 40 ml etanolu a 2 ml indikátoru. Tato se směs se zneutralizuje 0,1 M KOH až do počínající červené barvy a přilije se do 2 g až 20g izolačního oleje. Poté se roztok po kapkách titruje ofaktorovaným 0,1 M KOH (podle vztahu (4.2)) z modré do červené, které je srovnatelné s 10 % roztokem $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ a trvá 15 sekund. Číslo kyselosti se pak vypočte: [24]

$$\check{C}K = \frac{a \cdot f \cdot 56{,}11 \cdot N}{v} \tag{4.3}$$

kde ČK je číslo kyselosti v mg KOH/g,

f je faktor 0,1 M KOH,

a je spotřeba roztoku 0,1 M KOH v cm^3,

N je molarita titračního alkoholového roztoku KOH,

v je navážka vzorku izolačního oleje v gramech.

Usazeniny a kaly

Nečistoty v izolačních olejích lze rozdělit dle jejich rozpustnosti v kapalinách na nerozpustné usazeniny a kaly. Nerozpustné usazeniny neboli sedimenty, které lze zachytit filtrací nebo odstředěním, znečisťují potrubí a brzdí cirkulaci oleje. Vznikají jako zplodiny oxidačního stárnutí izolačního oleje. Rozpustné kaly jsou polymerizované produkty degradace pevných a kapalných izolačních materiálu. Zvětšují schopnost izolačního oleje pohlcovat vodu a působí katalyticky na chemické reakce. To se projevuje na velikosti mezipovrchového napětí na rozhraní voda-olej a vnitřní rezistivity, které klesají a zvyšují ztrátový činitel a permitivitu. Zjištění zda testovaný olej obsahuje rozpustné kaly, se provádí vizuální

kontrolou oleje zředěného n-heptanem po promíchání a dostání 24 hodin v temnu. Látky, které se nerozpustí v n-heptanu, jsou například pryskyřičné nebo asfaltové látky. [8]

Měření průrazného napětí

Průrazné napětí je jedním z nejčastěji měřených parametrů izolačních olejů, je přímým ukazatelem jejich jakosti. Hodnota průrazného napětí závisí především na obsahu vody, plynů, nečistot a produktů stárnutí. Je definováno jako poměr průrazného napětí k vzdálenosti zkušebních elektrod, kde průrazné napětí je nejmenší naměřené napětí, při kterém dojde při zkoušce k prvnímu výboji mezi elektrodami.

Určení hodnoty průrazného napětí se provádí šest po sobě jdoucích průrazů po pěti minutách ve zkušební komůrce o objemu 350-600 ml, kde jsou umístěny dvě leštěné elektrody z mosazi o pevné vzdálenosti 2,5 mm. Ze získaných hodnot se vypočte aritmetický průměr (4.4), směrodatná odchylka (4.5) a variační koeficient (4.6). [25]

Podle hodnoty průrazného napětí zjistíme, zda olej obsahuje emulgovanou vodu, nečistoty a plyny, ale nikoliv stupeň zestárnutí oleje.

$$\overline{U_p} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_{pi}}{n} \tag{4.4}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\overline{U_p} - U_{pi}\right)^2}{n-1}} \tag{4.5}$$

$$v = \frac{s}{\overline{U_p}} \cdot 100\% \tag{4.6}$$

Kde $\overline{U_p}$ je aritmetický průměr z naměřených hodnot [kV],
U_{pi} je hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů [kV],
s je směrodatná odchylka [kV],
n je počet průrazů, tedy pro jedno měření n=6,
v je variační koeficient [%].

Pokud je hodnota variačního koeficientu vyšší než 20 %, musí se zkoušky zopakovat s novým vzorkem izolačního oleje. Pokud opět vyjde variační koeficient větší, než 20 % je olej prohlášen za nevyhovující.

Určení vnitřní rezistivity

Měřením vnitřní rezistivity zjistíme, zda izolační olej obsahuje vodu a cizí složky. Vnitřní rezistivitu je možné určit pomocí pikoampérmetru z proudu protékajícím vzorkem oleje. Měřící intenzita pole se volí podle druhu testovaného oleje, pokud není uvedeno, volí se intenzita pole 0,25 MV·m^{-1}. Kladný potenciál se připojuje na vnější elektrodu měřící nádoby. Poté se vzorek elektrizuje po určitou dobu, která je opět dána druhem izolačního oleje, pokud není uveden, elektrizuje se po dobu 60 s. Po uplynutí této doby se spočte hodnota vnitřního elektrického odporu ze znalosti Ohmova zákona a dosadí se do (4.7). [8]

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \cdot 10^{-2} \tag{4.7}$$

Kde ρ_v je hodnota vnitřní rezistivity [Ω·cm],

C_0 je kapacita prázdné měřící nádoby [F],

R_v je naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu [Ω],

ε_0 je permitivita vakua 8,8·10^{-12} [F·m^{-1}].

Ztrátový činitel a relativní permitivita

Měření se provádí na Scheringově můstku, do jehož obvodu se umístí vzorek izolačního oleje a poté se můstek vyváží. Pomocí můstku je možné stanovit i relativní permitivitu. [24]

Relativní permitivita charakterizuje namáhání izolace v elektrickém poli, její hodnota u izolačních olejů dosahuje 2 až 3. Relativní permitivita závisí na teplotě a stupni zestárnutí oleje. Napomáhá jako další parametr určit čistotu izolačního oleje. Ztrátový činitel a relativní permitivitu lze vypočítat podle následujících vztahů (4.8), (4.9), (4.10), (4.11): [8]

pro tg δ je < 0,1

$$tg\delta = tg\delta_1 - \frac{C_0}{C_1} \cdot tg\delta_0 \tag{4.8}$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \tag{4.9}$$

pro tg δ je > 0,1

$$tg\delta = tg\delta_1 \tag{4.10}$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \cdot (1 + tg^2\delta_1) \tag{4.11}$$

Kde $tg\delta_0$ je ztrátový činitel měřicí nádoby se vzduchem,
$tg\delta_1$ je ztrátový činitel měřicí nádoby naplněné zkoušeným izolačního oleje,
C_1 je kapacita měřicí nádoby se vzduchem [F],
C_0 je kapacita měřicí nádoby naplněné zkoušeným izolačního oleje [F].

5 Porovnání vlastností izolačních olejů

Tato kapitola je zaměřena na porovnání fyzikálně-chemických parametrů minerálních, syntetických a rostlinných olejů. Mezi fyzikální parametry izolačních olejů patří bod vzplanutí, bod vznícení, bod tuhnutí, hustota, viskozita a další. Mezi chemické parametry izolačních olejů patří číslo kyselosti, vlhkost, obsah PCB látek a další.

Nejprve budou popsány parametry jednotlivých druhů izolačních olejů. K popisu jsou vybrány oleje již používané v praxi. Poté budou porovnány jednotlivé parametry mezi minerálními a syntetickými oleji a mezi minerálními a rostlinnými oleji.

Minerální oleje

Mezi výhody minerálních olejů patří: nízké pořizovací náklady minerálního oleje, malé náklady na údržbu, malá viskozita při nízkých teplotách, předpokládaná dlouhá životnost, snadné zpracování a regenerace disponují velmi vysokým průrazným napětí a odolnosti proti přepětí.

Nevýhody: vyšší náklady na instalaci transformátoru plněným minerálním olejem-ochrana proti unikajícímu oleji, relativně nízký bod hoření, vyroben z ropy-neobnovitelný zdroj, toxicita.

Jakožto zástupce minerálních olejů bude představen olej OMV trafo IEC II. Je to neinhibovaný izolační olej s velmi nízkým dielektrickým ztrátovým koeficientem a velmi vysokým průrazným napětím. Je odolný vůči přepětí a vykazuje mimořádnou oxidační stabilitu. Nízký bod tuhnutí a malá viskozita za nízkých teplot umožňují bezpečný přenos a odvod tepla i při velmi nízkých teplotách. Dále tento olej netvoří za vysokých teplot téměř žádné kaly a kyseliny. Chová se neutrálně vůči izolacím a zaručuje odolnost proti zkratu i po extrémně dlouhé době provozu. Dále budou uvedeny technická data tohoto oleje. **[**28**]**

Tab. 5.1 Vlastnosti minerálního oleje OMV trafo IEC II převzato z [28]

Charakteristický parametr	Jednotka	OMV trafo IEC II
Hustota při 15 °C	$kg \cdot dm^{-3}$	0,862
Bod vzplanutí	°C	145
Viskozita při 40 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	9,5
Viskozita při -30 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	850
Bod tuhnutí	°C	<-60
Číslo kyselosti	mg $KOH \cdot g^{-1}$	<0,01
Obsah PCB	$mg \cdot kg^{-1}$	0

Rostlinné oleje

Hlavními výhodami rostlinných izolačních olejů jsou jejich téměř stoprocentní biologická odbouratelnost, pomalejší stárnutí papírové izolace vinutí, možnost mísení s minerálními oleji, nízké náklady na údržbu, použití transformátorů plněných rostlinným olejem uvnitř budov, netvoří kaly, snadná likvidace.

Nevýhody těchto olejů jsou především nízký bod tuhnutí, nízká viskozita, malá oxidační stabilita, použití v pouze hermeticky uzavřených transformátorech.

Představen bude rostlinný olej Envitotemp FR3 vyrobený společností Cooper Power Systems. Neobsahuje ropné látky, halogeny, silikony, korozivní síru, nebo jakýkoliv jiný sporný materiál. Je složen z 98,5 % z rostlinného oleje vyrobeného ze sojových bobů, dále obsahuje antioxidanty, aditivum podporující viskozitu za studena a barvivo. Tímto olejem lze plnit nové transformátory, ale i staré transformátory, které byly dříve naplněny minerálním olejem. Je nerozpustný ve vodě a nekorozivní. Na trhu je již deset let a je jím naplněno více než 300 000 transformátorů. Je velice spolehlivý. [30]

Tab. 5.2 Vlastnosti rostlinného oleje Envitotemp FR3 převzato z [30]

Charakteristický parametr	jednotka	Envitotemp FR3
Relativní hustota při 15 °C	$kg \cdot dm^{-3}$	<0,96
Bod vzplanutí	°C	310-320
Viskozita při 40 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	<50
Viskozita při 100 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	<15
Bod tuhnutí	°C	-18 až - 24
Číslo kyselosti	$mg\ KOH \cdot g^{-1}$	<0,06
Obsah PCB	$mg \cdot kg^{-1}$	0
Obsah vody	$mg \cdot kg^{-1}$	150

Syntetické oleje

Výhody syntetických olejů jsou, že se můžou používat v transformátorech uvnitř objektů, mají velmi nízký bod tuhnutí, nízké náklady na údržbu, nízkou viskozitu.

Nevýhodou syntetických olejů je jejich špatná kompatibilita s ostatními oleji a jejich vysoká cena, která je několikanásobně vyšší než u minerálního oleje.

Představení syntetického oleje Midel 7131 vyrobeného společností M&I Materials Ltd. Midel 7131 je syntetický oleje vyrobený na bázi esterů. Je netoxický a biologicky odbouratelný. Největší předností tohoto oleje je vysoká hodnota bodu vznícení (<300 °C). Zajišťuje dlouhodobou stabilitu při extrémních změnách teplot. Dále má výborné dielektrické

vlastnosti a velkou oxidační stabilitu, díky které může být použit ve všech druzích transformátorů. [29]

Tab. 5.3 Vlastnosti syntetického oleje Midel 7131 převzato z [29]

Charakteristický parametr	jednotka	Midel 7131
Relativní hustota při 20 °C	$kg \cdot dm^{-3}$	0,97
Bod vzplanutí	°C	275
Viskozita při 40 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	28
Viskozita při -20 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	1500
Bod tuhnutí	°C	-60
Číslo kyselosti	$mg\ KOH \cdot g^{-1}$	<0,01
Obsah PCB	$mg \cdot kg^{-1}$	0
Obsah vody	$mg \cdot kg^{-1}$	50

Porovnání jednotlivých parametrů izolačních olejů

Hustota izolačních kapalin se u všech tří zástupců téměř neliší, ale minerální olej OMV trafo IEC II je z nich určitě nejřidší.

Bod vzplanutí je u rostlinného Envitotemp FR3 a syntetického oleje Midel 7131 cca 2 krát vyšší než u minerálního oleje OMV trafo IEC II, proto jsou tyto oleje klasifikovány jako méně hořlavé a mohou se použít uvnitř nebo v relativní blízkosti objektů.

U viskozity jsou hodnoty již rozdílné. Nejvyšší hodnoty dosahuje rostlinný olej, u kterého je to ovlivněno složením. Rostlinný olej se skládá z nízkého procenta nenasycených mastných kyselin, které snižují viskozitu, ale zhoršují oxidační stabilitu. Vyšší hodnota viskozity by mohla působit poněkud nepříznivě, jelikož olej např. v transformátoru musí plnit i funkci chladícího media. Kapaliny vyšší viskozity potřebují čerpadla pro zvýšení proudění kapaliny v důsledku rychlejšího pohybu částic je stroj lépe chlazen. Kapaliny rostlinného původu se zdají také velice perspektivní, použijí se tam, kde nejsou kladeny vysoké nároky na elektrickou pevnost. Jejich užití je však i ve výkonových transformátorech.

Oxidační stabilitu má rostlinný taktéž nejhorší, proto je důležitý obsah nasycených mastných kyselin, které oxidační stabilitu naopak zvyšují. Nejlepší oxidační stabilitou disponuje syntetický olej.

U bodu tuhnutí dosahuje rostlinný olej nejhorších výsledků ze stejného důvodu jako je tomu u viskozity. Obsahuje málo nenasycených mastných kyselin, proto je jeho bod tuhnutí vyšší, než je tomu u minerálního a syntetického oleje.

Obsah vody v oleji je přímo závislý na rychlosti stárnutí papíru. V porovnání u tohoto parametru dopadl nejhůře minerální olej, jelikož syntetický a rostlinný olej mají na rozdíl od minerálního oleje schopnost zachycovat vlhkost. Tím snižují obsah vody v papírové izolaci, která by měla být co nejsušší. Například syntetický olej při teplotě 60 °C, obsahuje 200 $mg \cdot kg^{-1}$ vody to se rovná 1,1 % obsahu vody v papíru. Při stejné teplotě, by minerální olej s obsahem vody 20 $mg \cdot kg^{-1}$ měl obsah vody v celulózy 2,6 %. To se rovná nejméně desetinásobnému poklesu v životnosti papíru. U rostlinného oleje je to 5-7 násobný pokles. [28]

Tab. 5.4 Porovnání charakteristických parametrů izolačních olejů.

		Minerální olej	Rostlinný olej	Syntetický olej
Charakteristický parametr	Jednotka	OMV trafo IEC II	Envitotemp FR3	Midel 7131
Relativní hustota při 15-20 °C	$kg \cdot dm^{-3}$	0,862	<0,96	0,97
Bod vzplanutí	°C	145	310-320	275
Viskozita při 40 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	9,5	<50	28
Viskozita při -20 °C	$mm^2 \cdot s^{-1}$	850	-	1500
Bod tuhnutí	°C	<-60	-18 až - 24	-60
Číslo kyselosti	$mg\ KOH \cdot g^{-1}$	<0,01	<0,06	<0,01
Obsah PCB	$mg \cdot kg^{-1}$	0	0	0
Obsah vody	$mg \cdot kg^{-1}$	10	150	50

Minerální oleje se používají ve všech transformátorech, kde je využíván systém izolace olej-papír. Syntetický olej MIDEL 7131 je též vhodný pro všechny druhy transformátorů jmenovitě se používá u distribučních, výkonových, usměrňovacích i trakčních transformátorů. Rostlinné oleje se z počátku používaly spíše v malých a středních transformátorech, ale dnes je jejich aplikace možná i ve velkých výkonových transformátorech, Jedním z těchto olejů je například Envirotemp FR3.

Závěr

Závěrem bych nejdříve popsal stručně čemu je věnována tato práce a poté bych se zaměřil na další vývoj v oblasti izolačních kapalin v transformátorech.

V první polovině této bakalářské práce jsem se věnoval způsobu chlazení transformátorů, jelikož chlazení přímo souvisí s životností těchto strojů. Dále jsem popsal důležité vlastnosti jednotlivých druhů izolačních olejů a jejich diagnostiku, která je velmi důležitá z pohledu spolehlivosti transformátoru. V druhé části jsem se zaměřil na již používané izolační oleje a porovnal jejich fyzikálně-chemické vlastnosti, které ovlivňují chlazení transformátoru a tudíž i jeho spolehlivost a životnost.

Minerální oleje jsou v transformátorech zastoupeny stále ve velké míře. Je to dáno jejich dlouhodobým vývojem, dobrými parametry a hlavně cenou. Bohužel jejich výroba není z obnovitelných zdrojů a jsou toxické. Proto se hledají jiné alternativy, které by byly z obnovitelných zdrojů. Od devadesátých let již několik společností začalo vyvíjet biologicky odbouratelné rostlinné oleje, kterými by nahradily minerální oleje. Dnes již takové oleje na trhu jsou, ale dosahují parametrů minerálních olejů jen v některých případech. Jejich největší problém je nízký bod tuhnutí a nízká viskozita. Proto by znamenalo použití transformátorů plněných rostlinným olejem v oblastech s nízkou teplotou změnu čerpání kapaliny a úpravy z hlediska odvodu tepla. To by znamenalo vyšší náklady. Spíše bych volil aplikaci těchto olejů v teplejších oblastech. Tento problém nenastává u olejů syntetických, které dosahují dokonce lepších parametrů než oleje minerální. Jejich největší problém je mnohonásobně vyšší cena. Nicméně bych je úplně nezatracoval, jelikož mají velmi vysoký bod vzplanutí, téměř dvakrát vyšší než minerální olej a jsou biologicky odbouratelné. Jejich využití vidím především v hustě obydlených oblastech.

Další vývoj těchto alternativních olejů **(**si myslím**)** nebude tak rychlý jako doposud. Vše je o finančních prostředcích. Dnes se bohužel na výzkum a vývoj tolik finančních prostředků nedostává. Energetické společnosti, které instalují transformátory bohužel hledí hlavně na cenu, bezpečnost a ekologie je tolik nezajímá. Ale jistý kompromis bych viděl v míře specializace použití. Pokud bychom měli přesné požadavky na konkrétní kapalinu, v jakých parametrech ubrat a v jakých ne, mohli bychom použít specifičtější olej a tím ušetřit náklady.

Použitá literatura

[1] ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů. [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: http://webs.zcu.cz/fel/kev/SES1/SES1/SES-obecn%a0%20%9f%a0st.pdf

[2] STÝSKALA, Vítězslav. Transformátory. [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_Transformatory%20nazorne%205_1.pdf

[3] HALUZÍK, E. *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Brno: Skriptum ediční středisko VUT Brno, 1986.

[4] MUŽÍK, Pavel. Ideální transformátor pro provoz a údržbu. [dokument ve formátu PDF]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: http://www.trasfor.cz/documents/Kterykam.pdf

[5] MRAJCA, René. Správné a nesprávné metody chlazení transformátorů VN | Elpro-Energo s.r.o.. [online]. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: http://www.elpro-energo.cz/download/spravne-a-nespravne-metody-chlazeni-transformatoru-vn.pdf

[6] WITTENBURG, Ryan. Friendly Transformer Oils. [online]. [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: http://www.nttworldwide.com/docs/ester2.pdf

[7] *Oleje.cz* [online]. c2009 [cit. 2012-05-16]. OLEJE. Dostupné z WWW: <http://oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju7>.

[8] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydáni. Praha: BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.

[9] Zkušební metody: Rozbory izolačních olejů [online]. ELDIAG, s.r.o.,c1999,update 2006. URL: <http://www.eldiag.cz/zkusebnimetody.html>[11. 4. 2012].

[10] *ČEPS Praha - Čebín | REVOS* [online]. 2012 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: http://www.revos.cz/reference/vykonove-prepinace/ceps-praha-cebin

[11] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.

[12] Oleje.cz-Základové oleje. *Oleje.cz* [online]. 2005-2009 [cit. 2012-04-25]. Dostupné z: http://oleje.cz/index.php?page=uzitecne_zakl_oleje&left=mainr

[13] Transformer Cooling Classes | EEP. *EEP - Electrical Engineering Portal* [online]. 2010 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z: http://electrical-engineering-portal.com/transformer-cooling-classes

[14] REŇÁK, Ladislav. *Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT Brno.

[15] KVITEK, Emil. *Materiály pro elektrotechniku* [online]. Pardubice, 2007. 63 s. Učební text. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Dostupné z WWW:<www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/ls/IMPEE/Skripta_materialy.pdf>.

[16] BOUDA, Václav. *Materiály pro elektrotechniku*. 1. vydáni. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 226 s. ISBN 80-010-2232-3.

[17] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydáni. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.

[18] REGENERACE TRANSFORMÁTOROVÝCH A TURBÍNOVÝCH OLEJŮ. ESB ELEKTRICKÉ STROJE A.S. *Http://www.esb-bez.cz* [online]. 2008 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf

[19] ČSN EN 60076-2. *Výkonové transformátory*: *Část 2: Oteplení. ČNI, 1999.*

[20] BRÁZDIL, Jiří. Syntetické oleje v elektrotechnice – normy a praktické zkušenosti. *AZVN-Asociace zkušeben vysokého napětí* [online]. 2011 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://www.azvn.cz/dokumenty/Synteticke%20oleje.pdf

[21] Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku, *Kam s vyřazenými kondenzátory a transformátory obsahujícími PCB? [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2000 [cit. 2012-05-23]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23806*

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

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

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

[25] BARTÁK, A., et al. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1984.

[26] *Vegetal oils as substitute for mineral oils. In: Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials: June 1-5, 2003, Nagoya, Japan [online]. Piscataway, NJ: IEEE, c2003 [cit. 2012-05-29]. ISBN 0-7803-7725-7. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1218460&contentType=Conference+Publications&queryText%3DVegetal+Oils+as+Substitute+for+Mineral+Oils*

[27] Natural Ester Dielectric Fluid Development. In: *PES TD 2005* [online]. 2006 [cit. 2012-05-29]. ISBN 0-7803-9194-2. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1668445&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D1668445

[28] Katalog OMV - Transformátorové oleje | LUBSTAR, a.s. *OMV trafo IEC II cs* [online]. 2008 [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: http://www.lubstar.cz/cs/omv/transformatorove-oleje/

[29] Document Library-technical: M&I Materials Ltd. -MIDEL. *Midel 7131-Technical Data Sheeds* [online]. 2010 [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/MIDEL_7131_Complete_Binder_of_Data_Sheets.pdf

[30] Envirotemp FR3 Dielectric Fluid. *Envirotemp FR3 Dielectric Fluid-Technical Data Sheeds* [online]. 2011 [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: http://www.cooperindustries.com/content/public/en/power_systems/products/dielectric_fluid/envirotemp_fr3_fluid.html

Přílohy

Příloha A – Bezpečnostní list pro Envirotemp FR3 fluid

Tato příloha je vložena na CD v souboru FR3-datasheed.pdf

Příloha B – Technický list pro Midel 7131

Tato příloha je vložena na CD v souboru

MIDEL_7131_Complete_Binder_of_Data_Sheets.pdf

Příloha C – Produktový list pro OMV trafo IEC II

Tato příloha je vložena na CD v souboru omv-trafo-iec-ii-cs.pdf