

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Možnosti zlepšení vlastností perspektivních  
elektroizolačních kapalin**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta elektrotechnická**  
Akademický rok: 2017/2018

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš KUBEŠ**  
Osobní číslo: **E15B0192P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Možnosti zlepšení vlastností perspektivních elektroizolačních kapalin**  
Zadávací 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. Popište vlastnosti uvažovaných elektroizolačních kapalin
2. Porovnejte tyto kapaliny s používanými minerálními oleji a vyčleňte problematické parametry těchto kapalin
3. Uveďte možnosti vhodné ke zlepšení těchto parametrů

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

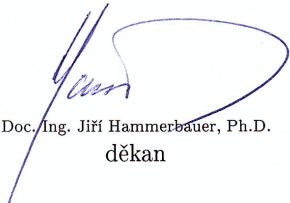
1. MENTLÍK, V. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
2. MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P. Diagnostika elektrických zařízení. 1.. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN: 978-80-7300-232-9
3. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore, Scopus, apod.)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Totzauer**

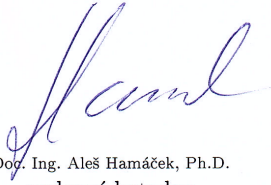
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

# Abstrakt

Tato bakalářská práce je koncipována jako teoretická rešerše se zaměřením na zlepšení vlastností alternativních elektroizolačních kapalin.

V první polovině práce jsou definovány základní kategorie izolačních kapalin, jejich výroba a oblasti použití společně s popisem jejich základních parametrů. V další části je přehled některých přírodních a syntetických olejů, jež lze nalézt na trhu. Poslední kapitola pojednává o fyzikálně-chemických rozdílech mezi minerálními a alternativními kapalinami. Práce je uzavřena možnostmi dalšího zlepšení, kde je věnován prostor popisu používaných aditiv a nanočástic.

## Klíčová slova

Elektroizolační kapaliny, transformátorový olej, minerální olej, rostlinný ester, syntetické oleje, obsah vlhkosti, oxidační stabilita, bod tekutosti, aditiva, inhibitory, nanočástice

# Abstract

Kubeš, Tomáš. *Possibilities for improving the prospective insulating fluids* [*Možnosti zlepšení vlastností perspektivních elektroizolačních kapalin*]. Pilsen, 2018. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Technologies and Measurement. Supervisor: Pavel Totzauer

---

This bachelor thesis is conceived as theoretical research with a focus on improving the properties of alternative electroinsulating fluids.

In the first half of the work, the basic categories of insulating fluids, their production and their field of application, together with a description of their basic parameters, are defined. In the next part is an overview of some natural and synthetic oils, which can be found on the market. The last chapter deals with the physico-chemical differences between mineral and alternative fluids. The work is concluded by possibilities of further improvement, where is space devoted to the description of used additives and nanoparticles.

## Keywords

Electrical insulating liquids, transformer oil, mineral oil, natural ester, synthetic oils, moisture content, oxidation stability, pour point, additives, inhibitors, nanoparticles

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 24. května 2018

Tomáš Kubeš

.....

Podpis

## Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil svůj vděk panu Ing. Pavlu Totzauerovi za jeho přístup, rady, ochotu a trpělivost při zastřešování této bakalářské práce. Dále zde chci poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu při studiu.

# Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratek	x
Úvod	1
<b>1 Krátké shrnutí elektroizolačních kapalin</b>	<b>2</b>
1.1 Základní rozdělení . . . . .	2
1.2 Způsoby výroby . . . . .	3
1.2.1 Minerální oleje . . . . .	3
1.2.2 Rostlinné oleje . . . . .	4
1.2.3 Syntetické oleje . . . . .	6
1.3 Oblasti využití . . . . .	8
1.4 Regenerace oleje . . . . .	10
<b>2 Popis parametrů elektroizolačních kapalin</b>	<b>12</b>
2.1 Neelektrické vlastnosti . . . . .	12
2.1.1 Viskozita . . . . .	12
2.1.2 Bod vzplanutí a bod hoření . . . . .	14
2.1.3 Bod tekutosti . . . . .	15
2.1.4 Číslo kyselosti . . . . .	15
2.1.5 Oxidační stabilita . . . . .	16
2.1.6 Obsah vody . . . . .	16
2.2 Elektrické vlastnosti . . . . .	17
2.2.1 Přeskokové napětí . . . . .	17
2.2.2 Relativní permitivita . . . . .	18
2.2.3 Ztrátový činitel . . . . .	19
2.2.4 Vnitřní rezistivita . . . . .	19
2.2.5 Polarizační index . . . . .	20



<b>3</b>	<b>Minerální olej a jeho náhrady</b>	<b>22</b>
3.1	Obecné požadavky na minerální oleje . . . . .	22
3.2	Výrobce M&I - porovnání olejů MIDEL . . . . .	23
3.3	Výrobce Cargill - porovnání olejů Envirotemp . . . . .	24
3.4	Výrobce Clearco Products - olej STO-50 . . . . .	25
3.5	Výrobce Savita - olej bioTRANSOL HF . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Možnosti dalšího rozvoje elektroizolačních kapalin</b>	<b>27</b>
4.1	Rozdíly vybraných vlastností kapalných izolantů . . . . .	27
4.1.1	Chemická struktura . . . . .	27
4.1.2	Obsah vlhkosti . . . . .	28
4.1.3	Oxidační stabilita . . . . .	30
4.1.4	Bod tekutosti . . . . .	32
4.1.5	Biodegradabilita . . . . .	32
4.2	Aditiva, inhibitory . . . . .	33
4.3	Nanokapaliny . . . . .	37
	<b>Závěr</b>	<b>39</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>40</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>47</b>
<b>A</b>	<b>Obrázky</b>	<b>47</b>
A.1	Zjednodušený princip destilace ropy . . . . .	47
A.2	Olejem plněný transformátor . . . . .	48
A.3	Proměnný kondenzátor v oleji . . . . .	48
<b>B</b>	<b>Tabulky</b>	<b>49</b>
B.1	Třídy hořlavých kapalin podle bodu vzplanutí . . . . .	49
B.2	Koncentrace plynů v oleji . . . . .	49

# Seznam obrázků

1.1	Destilační procesy při tvorbě minerálního oleje . . . . .	3
1.2	Příklad hydrogenace základního aromatického uhlovodíku . . . . .	4
1.3	Postup výroby přírodního oleje . . . . .	5
1.4	Zobrazení struktury bifenilu . . . . .	6
1.5	Rozdíl strukturální stavby mezi uhlovodíkovým polymerem a silikonovým olejem . . . . .	7
1.6	Časová linka vývoje a použití syntetických esterů jako elektroizolační kapaliny	7
1.7	Ukázka použití izolačního oleje - řez průchodkou a trafem . . . . .	8
1.8	Ukázka použití izolačního oleje - řez VN olejovým vypínačem . . . . .	8
1.9	Příklady kabelů s oběhem oleje . . . . .	8
1.10	Ukázka použití izolačního oleje - řez diferenčním senzorem tlaku . . . . .	9
1.11	Struktura zeolitů a Fullerova hlinka . . . . .	10
2.1	Princip určení viskozitního indexu . . . . .	14
2.2	Clevelandova metoda otevřeného kelímku . . . . .	15
2.3	Nádoba pro měření přeskovového napětí dle ČSN EN 60156 . . . . .	17
2.4	Ukázka zapojení Scheringova a automatického můstku . . . . .	18
2.5	Působení vnějšího elektrického pole na dielektrikum . . . . .	20
2.6	Zobrazení celkového proudu a jeho dílčích složek . . . . .	21
4.1	Ukázka strukturálního uspořádání obecného esteru . . . . .	27
4.2	Ukázka strukturálního uspořádání přírodního esteru . . . . .	28
4.3	Ukázka strukturálního uspořádání syntetického esteru . . . . .	28
4.4	Způsob přitahování vody k esteru . . . . .	29
4.5	Vliv obsahu vlhkosti na přeskovové napětí různých typů izolačních kapalin	29
4.6	Životnost celulózy během termálního stárnutí u oleje FR3 a minerálního oleje . . . . .	30
4.7	Proces oxidace mastné kyseliny v přírodním oleji . . . . .	32
4.8	Biologická odbouratelnost používaných elektroizolačních kapalin . . . . .	33
4.9	Chemická struktura antioxidantu DBPC, DBP a TBHQ . . . . .	33
4.10	Strukturní vzorec benzotriazolu . . . . .	34
4.11	Strukturní vzorec poly alkyl methakrylátu - PAMA . . . . .	34

4.12	Strukturní vzorec vybraných vodíkových akceptorů . . . . .	36
4.13	Strukturní vzorec kopolymeru styrenu a maleinanhydridu . . . . .	36
4.14	Struktura nanočástic $\text{Fe}_3\text{O}_4$ o velikosti 30 nm a čistotě 99 % . . . . .	37
4.15	Příklad postupu výroby nanokapaliny na bázi přírodního oleje . . . . .	38
A.1	Zjednodušený princip destilace ropy . . . . .	47
A.2	Olejem plněný transformátor . . . . .	48
A.3	Proměnný vzduchový kondenzátor v oleji . . . . .	48

# Seznam tabulek

2.1	Porovnání dynamické viskozity při teplotě 20 °C některých olejů . . . . .	13
2.2	Stav izolace podle velikosti polarizačního indexu $p_i$ . . . . .	21
3.1	Vybrané vlastnosti nepoužitého minerálního oleje . . . . .	22
3.2	Porovnání olejů MIDEL 7131 a MIDEL eN 1204 s minerálním olejem . . .	23
3.3	Srovnání olejů Envirotemp FR3 a FR 200 . . . . .	24
3.4	Parametry silikonového oleje STO-50 . . . . .	25
3.5	Technické údaje pro přírodní olej bioTRANSOL HF . . . . .	26
4.1	Přibližné hodnoty pro nasycení transformátorových olejů vodou . . . . .	30
4.2	Skladba mastných kyselin u některých zástupců rostlinných olejů . . . . .	31
4.3	Vliv PAMA a PSMA na bod tekutosti vybraných přírodních olejů . . . . .	35
B.1	Třídy hořlavých kapalin podle bodu vzplanutí . . . . .	49
B.2	Koncentrace plynů v elektroizolačních kapalinách po 90 výbojích . . . . .	49

# Seznam symbolů a zkratek

$\eta$ .....	Dynamická viskozita [ $Pa.s$ ].
$\tau$ .....	Tečné napětí [ $Pa$ ].
$du$ .....	Rychlost toku [ $m/s$ ].
$dx$ .....	Souřadnice směru ve směru kolmém na proudění kapaliny [ $m$ ].
$\nu$ .....	Kinematická viskozita [ $mm^2/s$ ].
$VI$ .....	Viskozitní index.
$\rho$ .....	Hustota [ $kg/m^3$ ].
$E_P$ .....	Elektrická pevnost [ $kV/mm$ ].
$U_P$ .....	Přeskokové napětí [ $kV$ ].
$d$ .....	Vzdálenost zkušebních elektrod [ $mm$ ].
$tg \delta$ .....	Ztrátový činitel.
$\varepsilon_r$ .....	Relativní permitivita.
$C_x, C_0$ .....	Kapacita nádoby s měřenou kapalinou; Kapacita prázdné nádoby [ $F$ ].
$\rho_v$ .....	Vnitřní rezistivita [ $\Omega.m$ ].
$\gamma$ .....	Konduktivita [ $S/m$ ].
$p_i$ .....	Polarizační index.
$i_{celk}$ .....	Celkový proud [ $A$ ].
$i_c, i_a, i_v, i_p$ .....	Dílčí složky celkového proudu; kapacitní, absorpční, vodivostní, povrchová [ $A$ ].
$R_i$ .....	Izolační odpor [ $\Omega$ ].
$M_r$ .....	Relativní molekulová hmotnost.
COC .....	Metoda Clevelandova otevřeného kelímku
PMCC .....	Metoda Penskyho-Martensova uzavřeného kelímku
PCB .....	Polychlorované bifenyly.
DBP, DBPC, TBHQ	Antioxidanty.
BTAH, BTA .....	Benzotriazol.
PAMA, PMA .....	Poly alkyl methakryláty.
PSMA .....	Kopolymery styrenu a maleinanhydridu.
VII .....	angl. - viscosity index improvements; Aditiva pro úpravu viskozitního indexu

# Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vlastnostmi alternativních elektroizolačních kapalin a jejich zlepšením. Důvodem pro zabývání se touto tematikou je hledání nových kapalných izolantů, které mohou v budoucnosti nahradit, dnes majoritně používané, minerální oleje. Právě u těchto olejů je problematická především jejich omezená zásoba zdrojové suroviny, toxicita, hořlavost a biodegradabilita.

Některé alternativní kapaliny se na trhu vyskytují již desítky let. Tyto kapaliny jsou uvedeny v kapitole 3. Na začátku kapitoly 4 je věnován prostor rozdílům alternativních kapalin oproti minerálním olejům a jsou zde popsány mechanismy, které panují v alternativních kapalinách. Další vývoj je představen v druhé polovině kapitoly 4, kde jsou jako možnosti ke zlepšení parametrů navrženy aditiva. Aditiva jsou zde rozčleněny na běžně používané příměsi (např. antioxidanty, pasivátory, depresanty atd.) a nanočástice, resp. nanokapaliny.

Nanokapaliny jsou touto dobou celosvětovým předmětem výzkumu. Modifikací kapalných izolantů nanočásticemi je možné zlepšit jejich elektroizolační a fyzikálně-chemické vlastnosti. Výzkum je soustředěn především na oleje minerální, avšak pro výše zmíněné nedostatky se provádí experimenty i s oleji přírodními [80, 82, 85]. Užití nanočástic nám zároveň může poskytnout snížení velikosti a váhy transformátorů [85].

K nalezení "ideálního" izolačního oleje bude třeba mnohaleté zkoumání, pro nalezení vhodných chemických poměrů, k dosažení požadovaných či dokonce lepších vlastností než mají minerální oleje. Důležitým bodem je prozkoumání vlivu povrchových úprav na různé typy nanočástic a optimalizování procesu přípravy nanokapalin. Zároveň by měla být věnována pozornost nalezení lepších aditiv pro přírodní estery, aby měly např. nižší bod tekutosti.

Jinou, spíše podpůrnou, možností by mohlo být vyvinutí regeneračních technik pro přírodní estery a syntetické oleje. Zavedení spolehlivého online monitorování či zlepšení diagnostických metod pro lepší pochopení dějů, které v elektroizolačních kapalinách panují.

Důraz při budoucím vývoji musí být kladen na ekologickou nezávadnost a maximální slučitelnost s životním prostředím, stejně jako na bezpečnost osob a majetku při případné nehodě.

# 1

## Krátké shrnutí elektroizolačních kapalin

Elektroizolační kapaliny se během technologického vývoje staly nedílnou součástí mnoha elektrotechnických zařízení. Své využití naleznou v různých aplikacích především pro odvod nadměrného tepla, jako elektrická izolace a také minoritně jako mazivo. Jejich konkrétní elementární vlastnosti jsou zmíněny v kapitole 2.

### 1.1 Základní rozdělení

Variant dělení těchto kapalin existuje pravděpodobně mnoho. Ucelené dělení nám z normativního hlediska poskytují normy ČSN EN 61039 - „*Klasifikace izolačních kapalin*” a ČSN EN 61100 - „*Klasifikace izolačních kapalin podle bodu hoření a výhřevnosti*” [1, 2].

Dělení dle surovin výroby [44]:

- **Minerální** oleje - rafinací (rektifikací/frakční destilací), míšením či modifikací ropy a ropných produktů.

I přes své vynikající elektrické vlastnosti mají řadu nevýhod jako např. nízký bod vzplanutí, špatná biodegradabilita, toxicita atp.

- **Rostlinné** oleje - rafinací ze semen rostlin a jiných vhodných biologických materiálů - směsi esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin.

Z výzkumného hlediska je těmto olejům v současnosti věnována pozornost. Značnou výhodou je možnost výroby z obnovitelných zdrojů a cena. Také nejsou postiženy některými nevýhodami minerálních olejů, avšak jejich elektroizolační vlastnosti jsou horší .

- **Syntetické** oleje - na bázi syntetických chemických produktů či syntetických esterů.

Dosahují stejných či lepších parametrů než oleje minerální a jsou jejich hlavní náhradou. Nevýhodou je jejich vyšší cena.

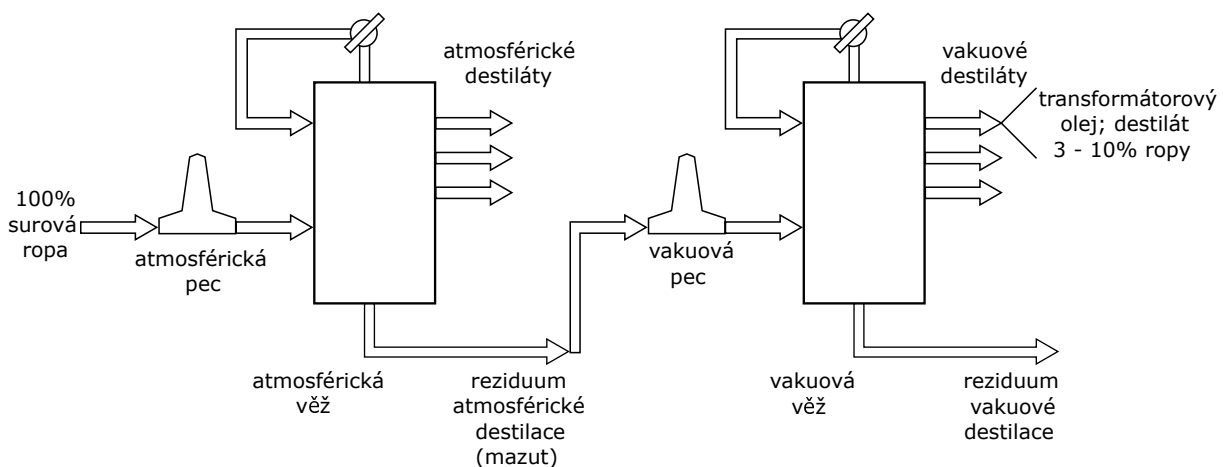
## 1.2 Způsoby výroby

### 1.2.1 Minerální oleje

Minerální olej je produktem několika bodového procesu úpravy ropy. Ropa je sloučeninou mnoha uhlovodíků. Proces výroby v jednotlivých krocích [26, 27, 28, 38]:

a) V prvním kroku je ropa podrobena **destilaci**, kdy jsou jednotlivé její frakce (skupiny uhlovodíků) vlivem působení teploty odděleny podle teploty varu a hustoty (viz příloha A.1). Přesněji řečeno je užito destilací (viz obr. 1.1):

- **atmosférické** - dochází k oddělení složek ropy s nízkým a středním bodem varu za atmosférického tlaku. Ze spodních, hustějších frakcí atmosférické věže jsou "zbytky" (mazut) použity k destilování ve vakuu.
- **vakuové** - je prováděna za sníženého tlaku, respektive vakua. Důvodem je udržení bodu varu jednotlivých frakcí pod teplotou, jejíž vlivem by došlo k termálnímu rozkladu molekul oleje. Vakuová destilace nám tedy umožňuje snazší oddělení jednotlivých frakcí, které by bylo za normálního tlaku těžké oddělit. Destilát transformátorového oleje, s relativně nízkým bodem varu, je odebrán z vyšší části věže.



Obr. 1.1: Destilační procesy při tvorbě minerálního oleje; zdroj [38]

Při výrobě transformátorového oleje je využito asi 3 až 10 % z celkového množství dodané ropy. To je dáno vyvážením obsažených látek v oleji (parafinické, naftanické, aromatické). Lehčí molekuly ovlivňují bod hoření, zatímco zvyšující se množství těžších molekul zvyšuje viskozitu celé frakce [38].

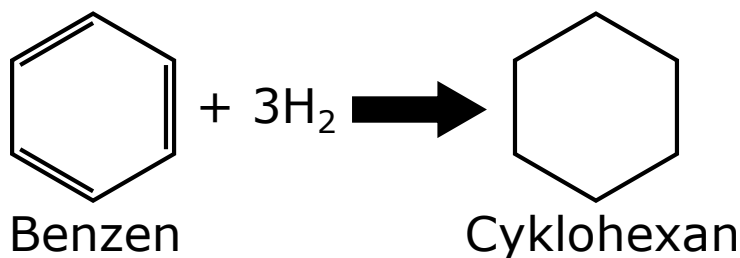
Ještě před samotnou destilací je ropa po vytěžení vhodně upravena tak, aby se z ní odstranila voda a různé soli - tzv. odsolování ropy [26].

b) Následuje **rafinace**, kdy se odstraňují složky, které svým působením zhoršují oxidační a termální stabilitu oleje. Jedná se např. o aromáty a heterosloučeniny (sloučeniny



síry, kyslíku, dusíku). Rafinace je dvojího typu: tzv. hydrokrakováním nebo selektivní extrakcí. Jednoduše popsáno:

- Při **hydrokrakování** je využito vodíku, kdy dochází k přeměně aromatických sloučenin na nasycené cykloalkany - tzv. hydrogenace. Takto se zbavíme nevýhod aromátů jako např. nízká viskozita a špatná oxidační či termální stabilita. Zároveň se odštěpují výše uvedené heterosloučeniny. Tento proces je ovlivněn tlakem (15 až 30 MPa) a teplotou (cca 400 °C) [28].

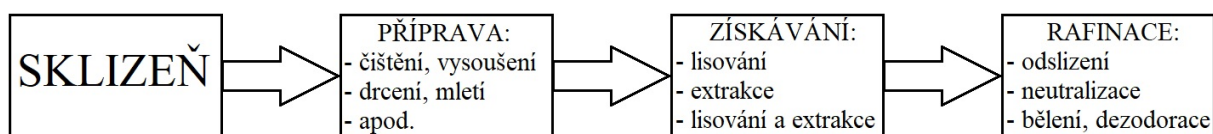


**Obr. 1.2:** Příklad hydrogenace základního aromatického uhlovodíku; zdroj [31]

- Při **extrakci** se používají tzv. selektivní rozpouštědla, kdy rozlišujeme polární a nepolární látky. Polární látky (aromáty, heterosloučeniny) jsou odebrány rozpouštědlem, čímž získáme rafinát - nepolární látky [29].
- c) Další etapou je **odparafinování**, při němž jsou odstraněny tuhé uhlovodíky (parafíny a cereziny). To má za následek snížení bodu teploty. Olej se tak chová vhodněji i za nižší teploty.
- d) **Dorafinace** slouží k separování zbylých nevhodných látek. Dorafinace může probíhat několika způsoby, přičemž nejnázší je užití adsorpce nečistot na aktivní hlince, kdy dojde k rozmíchání hlinky v teplém oleji a následnému odfiltrování hlinky s adsorbovanými nečistotami. Jindy se (podobně jako u rafinace) používají rozpouštědla, avšak v menším množství [29, 30].
- e) **Míšení a aditivace**. Výsledný olej může být směsí několika složek(olejů), které se objevují při procesu úpravy ropy. Přidáním aditiv se dále zlepšují jeho vlastnosti. Blíže o aditivech v kapitole 4.2.

## 1.2.2 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje jsou získávány z olejnin, tj. plodin ve kterých se tvoří olej (nejčastěji v semenech). Na našem území se jedná především o řepku, slunečnici, sóju, hořčici, mák, len atd. Ze zahraničí olivy, palmy, hrozny atd. Po chemické stránce přírodní oleje sestávají ze směsi esterů, glycerinů a nasycených i nenasyčených mastných kyselin[34, 35]. Postup



Obr. 1.3: Postup výroby přírodního oleje; zdroj [34]

výroby svým způsobem záleží na druhu rostliny, podle které se technologie výroby optimalizuje. Lze však uvést obecný postup, který by měl být shodný pro většinu plodin [33, 34]:

- a) Samotnému získávání oleje předchází od sklizně několik procesů **přípravy** jako např. očišťování, vysoušení, drcení a mletí plodin.
- b) Následuje **získávání** oleje, které se provádí buď lisováním, extrakcí, nebo kombinací obou metod.

- Při **lisování** se využívá působení tlaku, kterým z částí rostlin získáme olej. K tomu se v praxi používá různých variant kontinuálního šnekového lisu. Lisování lze provádět jednostupňově či dvoustupňově (tzv. předlis a dolis). Dvoustupňové lisování zlepšuje výtěžnost olejů např. u řepky a slunečnice. Dále může být lisování buď za studena nebo za tepla. U studeného lisování nepřesahuje teplota vylisovaného oleje 50 °C. Při lisování za tepla je semeno před lisováním cíleně zahříváno až na teplotu okolo 100 °C, což zvyšuje výtěžnost, ale i obsah příměsí [32].

Procesem lisování se kromě oleje získají i tzv. pokrutiny (pevné zbytky).

- **Extrakce** se vykonává buď přímo před lisováním (např. u sóji), nebo po lisování u pokrutin. Při extrakci se pro získání oleje využívá organického rozpouštědla, které na sebe váže olej. Takto se získají pevné části zbavené oleje a kapalná směs oleje s rozpouštědlem. Nakonec se olej oddělí od rozpouštědla [36].

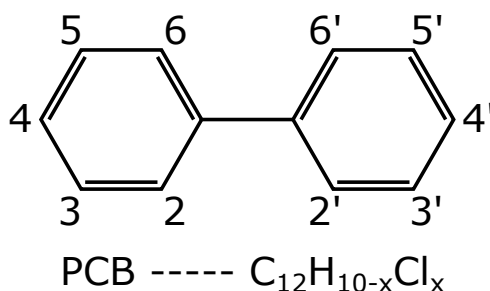
- c) Posledním krokem je **rafinace** oleje, kde dochází k procesům, které mají za úkol odstranit různé nevhodné příměsi z oleje jako např. fosfor (vázan na fosfolipidy), barviva, vosky, bílkoviny, slizovité látky, kaly apod. Jedná se o tyto procesy [32, 36]:

- Při **odslizení** dochází k odstraňování rostlinných slizů a fosfolipidů. Toto je důležitým krokem, neboť fosfolipidy při zvýšených teplotách způsobují připékání na styčné plochy, čímž dochází k narušení materiálu a omezení rozsahu využitelnosti.
- **Neutralizace** odstraňuje volné mastné kyseliny pomocí louhu sodného (NaOH). Louh s volnými mastnými kyselinami tvoří mýdlo, které se pak odstraní vodou.
- **Bělení** využívá tzv. bělicí hlinky pro minimalizování obsahu barviv a pigmentů (karoteny, chlorofyly atd.), těžkých kovů a zbytků fosforu.
- **Dezodorace** slouží k odstranění látek zhoršujících vůni a chuť oleje. To probíhá pomocí zvýšené teploty a vodní páry.

### 1.2.3 Syntetické oleje

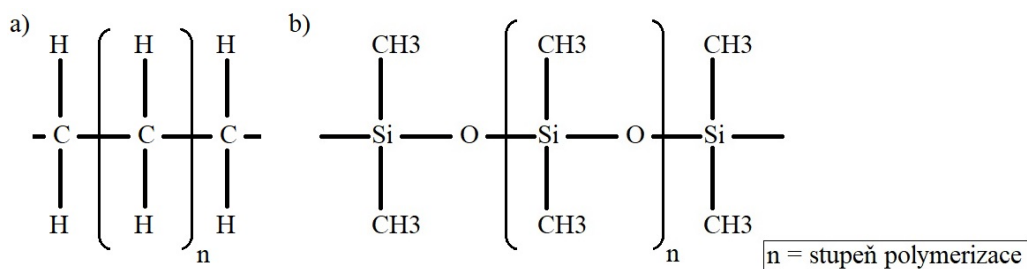
Do této kategorie spadá velké množství kapalin nejrůznějšího původu. Jedná se např. o modifikace uhlovodíků, silikonové kapaliny, syntetické estery atd. Zde je uvedeno několik příkladů [37, 41, 42, 43]:

- a) **Chlorované uhlovodíky** mají, oproti klasickým minerálním olejům, ve své struktuře chemicky přidán chlór. Počet atomů chlóru a stavba a počet atomů uhlovodíku určují jejich výsledné vlastnosti. Do této kategorie spadají PCB (polychlorované bifenyly), které byli jako první syntetické kapaliny používány ve 30. až 70. letech 20. století, ačkoliv první syntéza proběhla již r. 1881. Celá tato skupina látek byla, pro jejich špatný vliv na životní prostředí, zakázána [38, 39, 40].



**Obr. 1.4:** Zobrazení struktury bifenilu. Chlór lze poté přidat až na 10 míst, čímž lze získat až 209 izomerů chlorbifenylu (asi 100 různých izomerů bylo nalezeno v PCB); zdroj [38]

- b) **Fluorované kapaliny** jsou deriváty uhlovodíků, aminů a esterů, ve kterých jsou atomy vodíku nahrazeny atomy fluoru. Mají velmi dobré elektroizolační vlastnosti a jsou chemicky stabilní do 500 °C. Používány jsou v transformátorech a výkonových vypínačích. Nevýhodou je, že při elektrickém výboji v nich vznikají kyseliny obsahující fluor, které mají špatný vliv na izolační systém a kovové části. Další nevýhodou, u některých z nich, je nízký bod tekutosti a nízká viskozita za nižších teplot [42, 47].
- c) **Polybuteny** vznikají polymerizací nenasycených uhlovodíků. Obecně mají velmi široké využití. V elektrotechnice se vyznačují elektrickou pevností, stabilitou vůči oxidaci, teplotě a UV záření. Dále mají nízký obsah chlóru a síry, což souvisí s ekologickou přijatelností a nízkou toxicitou. Používají se v izolačních systémech kabelů či svitkových kondenzátorech.
- d) **Silikonové kapaliny** mají svou stavbu založenou na vazbách křemíku s kyslíkem a jejich polymeraci. Jsou ohnivzdorné, termálně a oxidačně stabilní, hydrofobní a mají dobré elektroizolační vlastnosti. Nepůsobí agresivně vůči kovům a organickým izolantům. Mají schopnost vytvářet si na povrchu vrstvu křemíku, která zabraňuje přístupu vzduchu. Nevýhodou je jejich vysoká cena, což omezuje jejich použití především na místa se zvýšeným rizikem požáru. Rozsah provozních teplot silikonových kapalin se

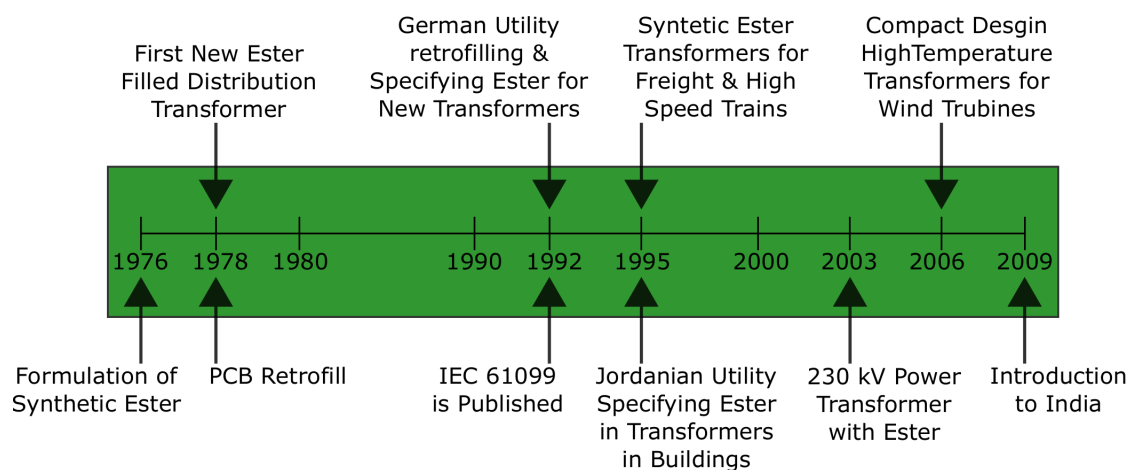


**Obr. 1.5:** Rozdíl strukturální stavby mezi uhlovodíkovým polymerem(a) a silikonovým olejem(b) PDMS; zdroj [46]

může pohybovat od -100 až 400 °C. Příkladem je Polydimethylsiloxan ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}$ )<sub>n</sub> - PDMS (v češtině Amodimethikon) [21, 46, 47, 61].

Silikonové kapaliny mají velkou odolnost vůči biologické degradaci, což souvisí s obtížnou likvidací a dalším omezením jejich použití [61]. Jsou používány např. v distribučních transformátorech s výkonem od cca 250 kVA do 9 MVA (napětí 11 až 66 kV) [21]. V elektrotechnice podléhají normě ČSN IEC 836 - „Specifikace silikonových kapalin pro elektrotechnické účely“.

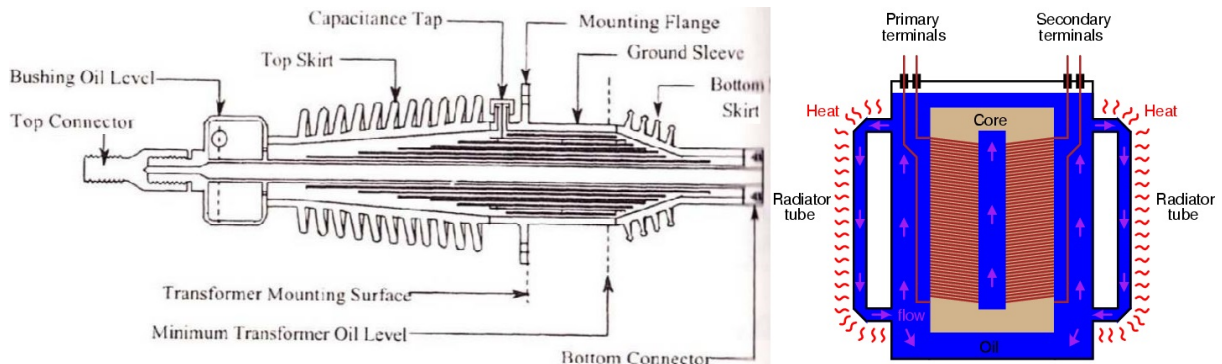
- e) **Organické** (syntetické) **estery** jsou tvořeny chemickou syntézou z olejů na přírodní bázi (viz kap. 4.1.1). Mají dobrou termální stabilitu a mnohem vyšší bod vzplanutí než minerální oleje. Dále jsou odolné vůči plynům a mají vyšší viskozitu. Uplatňují se v transformátorech a vysokofrekvenčních kondenzátorech. Organické estery mají vhodné mazací vlastnosti, což jim umožňuje použití v systémech s nuceným oběhem chladiva [21]. Také dokážou absorbovat vlhkost z celulózy, což výrazně prodlouží její životnost (viz kap. 4.1.2). Dnes jsou patrně hlavní náhradou za minerální oleje, či toxické a nestabilní syntetické oleje, především v silových, trakčních a distribučních transformátorech [61]. Typickým příkladem jsou oleje: MIDEL 7131, Envirotemp 200, Aral 4569, Shell fluid 4600 atd. O některých těchto olejích je pojednáno v kapitole 3. Časový vývoj syntetických esterů lze sledovat na obr. 1.6



**Obr. 1.6:** Časová linka vývoje a použití syntetických esterů jako elektroiz. kapaliny; zdroj [61]

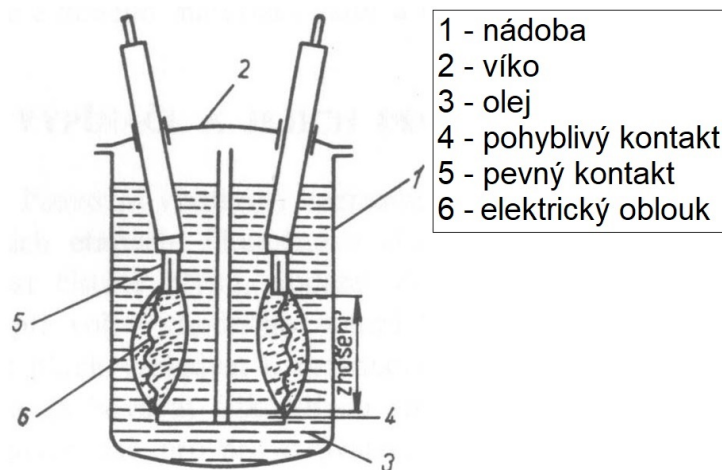
## 1.3 Oblasti využití

- **VN transformátory** - izolační systém, průchodky, konzervátor, přepínač odboček. Další vhodná ilustrace v příloze A.2.



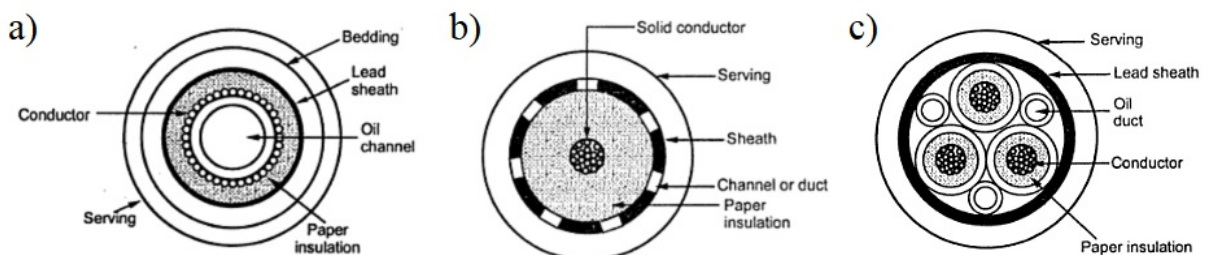
Obr. 1.7: Ukázka použití izolačního oleje - řez průchodkou a transformátorem; převzato z [44]

- **Spínací přístroje**



Obr. 1.8: Ukázka použití izolačního oleje - řez VN olejovým vypínačem; převzato z [49]

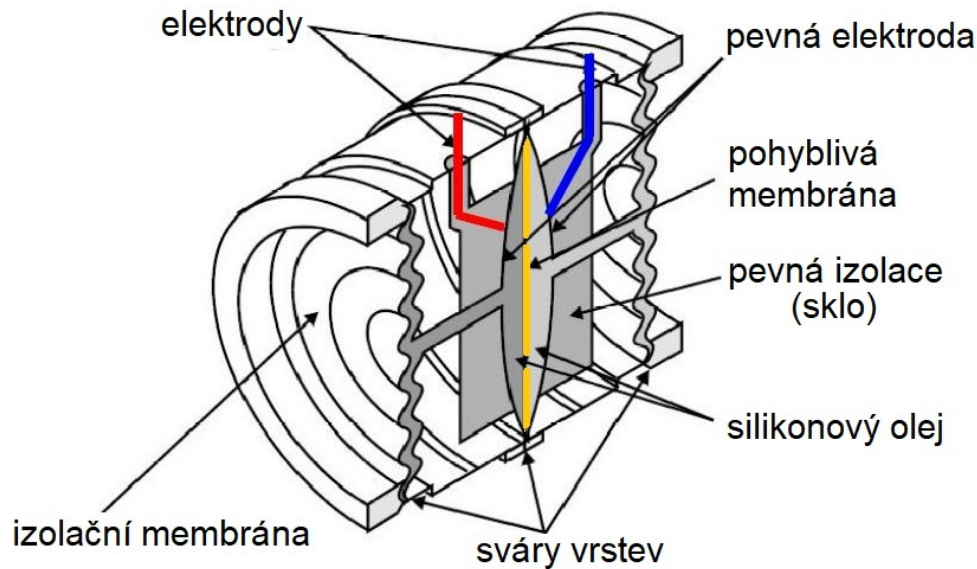
- **Kabely** - kabely s dutými žilami, potrubní kabely a jiné kabely, které jsou vyrobeny tak, aby jimi protékal olej



Obr. 1.9: Příklady kabelů s oběhem oleje; převzato z [48]

Kabel **a)** je prosté konstrukce, kde jsou vodiče vedeny kolem ocelového jádra, které vytváří kanál pro olej. Kabel **b)** má olejovodné kanálky mezi papírovou izolací a pláštěm kabelu. Poslední tříjádrový kabel **c)** má tři kanálky, umístěné na místech kde bývá materiál výplně.

- **Kapacity** - proměnné (viz příloha A.3), fóliové (svitkové), senzory založené na změnách kapacity



**Obr. 1.10:** Ukázka použití izolačního oleje - řez diferenčním senzorem tlaku; převzato z [50]

Uvedený senzor je použit při měření rozdílu tlaku. Představme si, že obě izolační membrány jsou vystaveny odlišnému tlaku. Tyto membrány působí na silikonový olej, jehož vlivem se vychýlí pohyblivá membrána z rovnovážné polohy. K vychýlení dojde ve směru od vyššího tlaku k nižšímu, čímž se mění  $d$ . Změna polohy membrány znamená změnu kapacity neboť platí:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad \left[ F; -, \frac{mm^2}{m} \right] \quad (1.1)$$

kde:  $\varepsilon$  ... permitivita dielektrika

$S$  ... plocha elektrody

$d$  ... vzdálenost elektrod

Změnu kapacity pak vhodně převedeme pro zjištění rozdílu tlaku.

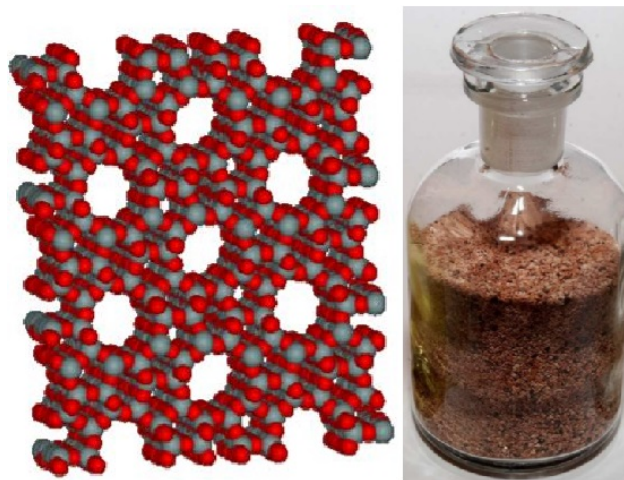
- **Reostaty**

## 1.4 Regenerace oleje

Kvůli působení procesů, které negativně ovlivňují parametry elektroizolačního oleje, jako např. oxidace, vlhkost, termální stárnutí atd. postupně dochází k ohrožení bezpečné funkce elektrického zařízení. Z tohoto důvodu byla vyvinuta technologie regenerace oleje, která nám umožňuje prodloužit jeho životnost a obnovit jeho vlastnosti. Regenerační procesy jsou technologicky rozvinuty především pro oleje *minerální*, užívané v transformátorech.

Hlavními ukazateli pro regeneraci jsou: číslo kyselosti, ztrátový činitel, oxidační stabilita, povrchové napětí apod. Proces regenerace odstraňuje z oleje vlhkost, kyselé složky, kaly, plyny, částice a další nežádoucí prvky, které přispívají ke zhoršení jeho stavu. Dále je popsán v několika bodech [7, 52, 54]:

- a) **Testování** vzorku oleje nám ukáže zda-li je regenerace možná v provozním stavu. Dále se můžeme dozvědět kolik oběhů oleje bude potřeba atp. Následkem testu lze provést obnovu samotného oleje nebo tzv. desludging kdy se čistí olej zároveň s vinutím, jádrem a dalšími konstrukčními prvky [7, 52].
- b) **Filtrace** se provádí pro zabránění vstupu pevných částic. Podle typu užitého filtru jsou zachycovány částice v řádech jednotek až pár desítek  $\mu\text{m}$ . Olej se po filtraci zahřívá. To umožní přechod vody z pevné části izolace vinutí do oleje, odkud ji pak lze odstranit. Filtrace nadále může proběhnout ještě několikrát, především pak před návratem oleje do transformátoru [54].
- c) **Sorpce** probíhá v sorpčních kolonách (jinak též perkolátory), kde dochází k hlavní obnově parametrů oleje. Odstraňují se zde nečistoty a různé produkty stárnutí oleje jako např. organické kyseliny, aldehydy, ketony atd. Sorpčním materiálem jsou tzv. zeolity (hlinitokřemičité minerály), které mají unikátní strukturu atomů, jenž vytváří kanálky konstantních rozměrů. Do nich lze pak zachytávat redundantní částice. Používá se Fullerova hlinka či oxid hlinitý [52, 53].



**Obr. 1.11:** Struktura zeolitů a Fullerova hlinka; převzato z [52]

Sorbční materiál nelze používat neomezeně. Po několika hodinách dojde k jeho nasycení a je třeba nutno provést tzv. reaktivaci, kdy se pomocí termálně-chemických pochodů ze sorbentu vytěsní adsorbované částice. Reaktivace sorbentu trvá několik hodin (cca do 24 h) a jednu náplň je možné, podle opotřebení, používat i několik let. Reaktivace může probíhat rovnou uvnitř kolony nebo mimo ni. Během reaktivačního procesu je většinou používána jiná sorbční kolona, aby se zajistila kontinualita regenerace [7, 52, 54].

- d) **Vysoušení a odplynění** probíhá ve vakuové komoře. Teplota vysušování se pohybuje mezi 30 až 40 °C. Dochází-li zároveň k vysoušení vinutí pohybuje se teplota kolem 80 °C. Vakuová komora je posledním zařízením, kterým olej projde před vypuštěním do transformátoru.
- e) **Aditivace** probíhá v poslední fázi regenerace. Po obnovení a změření vlastností oleje se doplní vhodné množství inhibitoru [7, 52].

Doba regenerace se může pohybovat v rámci několika dní až týdnů, což je závislé na míře znečištění oleje a jeho množství. Důležité je provést regeneraci oleje včas, než dojde k vážnější degradaci (která již nebude odstranitelná) a případně zničení zařízení [53, 54].



## 2

# Popis parametrů elektroizolačních kapalin

V závislosti na předpokládané aplikaci, dbáme na výběr olejů s co nejvhodnějšími parametry. Tyto parametry v základě rozlišujeme na elektrické a neelektrické.

## 2.1 Neelektrické vlastnosti

Tato kategorie lze dále rozdělit na parametry *fyzikální* a parametry *chemické*. Do neelektrických vlastností řadíme především viskozitu, bod tuhnutí, bod vzplanutí a hoření, číslo kyselosti, obsah vody, oxidační stabilitu atd.

### 2.1.1 Viskozita

Slouží pro vyjádření tekutosti látky a charakterizuje její vnitřní tření. Viskozitu (jinak též vazkost) rozlišujeme dynamickou a kinematickou. Oleje s nižší viskozitou jsou tekutější - mají menší vnitřní odpor proti proudění, proti toku. Vyšší viskozita olejů (hustější oleje) naopak znamená vyšší odpor a tím také pomalejší tok [3]. Pro měření viskozity kapalin se používají viskozimetry, které měří odpor, který kladou kapaliny nebo plyny postupnému pohybu. Tento odpor je vyvozen silami působícími mezi jednotlivými vrstvami proudícího média [13]. Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity řeší norma ČSN EN ISO 3104 [5]. Na viskozitu má vliv především teplota, v menší míře pak i tlak. Platí, že čím vyšší teplota, tím je hodnota viskozity menší (kapalina je tekutější).

#### a) Dynamická viskozita - $\eta$

Z fyzikálního hlediska se s dynamickou viskozitou setkáváme u Newtonova zákona viskozity:

$$\tau = \eta \frac{du}{dx} \quad \left[ Pa; Pa.s, \frac{m/s}{m} \right] \quad (2.1)$$

kde:  $\tau$  ... tečné napětí

$\eta$  ... dynamická viskozita

$du$  ... rychlost toku

$dx$  ... souřadnice směru ve směru kolmém na proudění kapaliny

Míru vnitřního tření vyjadřuje dynamická viskozita. Udávána v jednotkách mPa.s. V tabulkách pak udávána pro hodnotu 20 °C:

**Tab. 2.1:** Porovnání dynamické viskozity při teplotě 20 °C některých olejů; převzato z [4]

Olej	$\eta_{20}$ [mPa.s]
ricínový	987
terpentýnový	1.49
transformátorový (minerální olej)	31.6

#### b) **Kinematická viskozita** - $\nu$

Charakterizuje vnitřní odpor při průtoku kapaliny za určitý čas, přičemž na kapalinu působí pouze gravitační síla [5]. Právě tato viskozita se objevuje v technické dokumentaci olejů na trhu. Udávaná v jednotkách mm<sup>2</sup>/s (dříve cSt - centistokesy). Kvůli vlivu teploty se udává její hodnota při rozdílných teplotách např. -30, 40 °C.

Je dána podílem dynamické viskozity a hustoty:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \left[ \text{mm}^2/\text{s}; \frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{kg}/\text{m}^3} \right] \quad (2.2)$$

kde:  $\nu$  ... kinematická viskozita

$\eta$  ... dynamická viskozita

$\rho$  ... hustota

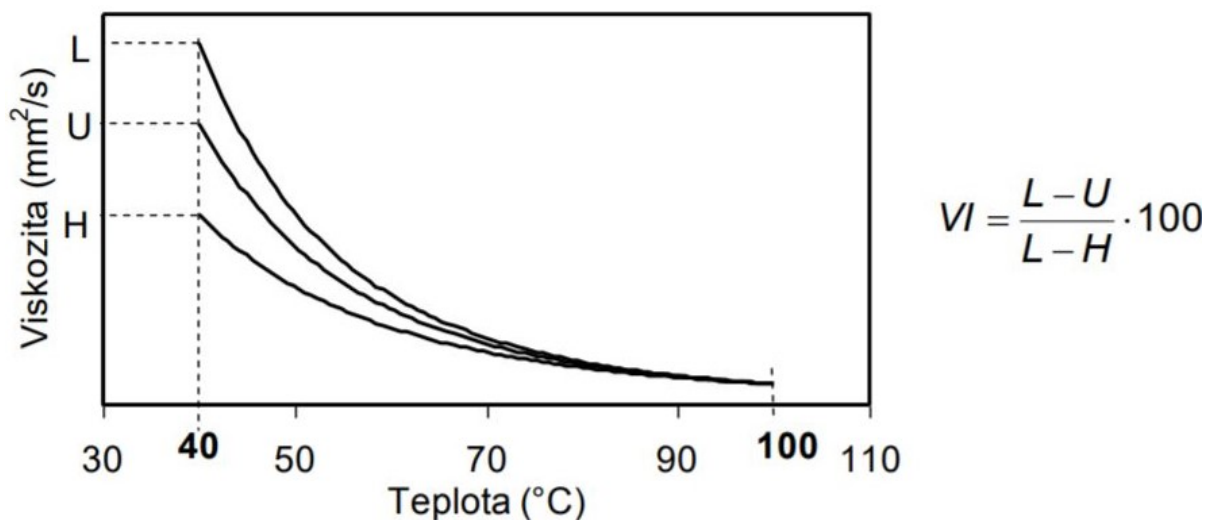
Jiný způsob určení je výpočtem pomocí viskozimetru. Viskozimetry jsou výrobcem kalibrovány a mají svou vlastní konstantu. Způsob určení viskozity se tedy liší podle přístroje. Viskozimetry se dle způsobu měření dělí na [13]:

- průtokové (kapilární) - využívají tlakové ztráty, která vzniká při laminárním proudění kapaliny kapilárou; např. Englerův
- tělískové - využívají odporu tření tělíska (kuličky), které se přímočaře pohybuje v měřeném prostředí; např. Höpplerův

- rotační - založeny na principu měření odporu, který kladou otáčivému pohybu vhodně zvolená tělesa (válec, kotouč) v měřeném prostředí

Některé viskozimetry pracují spojitě, např. měřením doby pádu kuličky v prostředí, které protéká zařízením (Höpplerův princip) [13].

S viskozitou dále souvisí tzv. **viskozitní index** ( $VI$ ). Zjednodušeně řečeno, se jedná o číslo, kterým vyjadřujeme jak se moc se mění viskozita oleje s teplotou. Vyšší  $VI$  znamená menší změny viskozity s teplotou. Výpočet viskozitního indexu je popsán na obr. 2.1



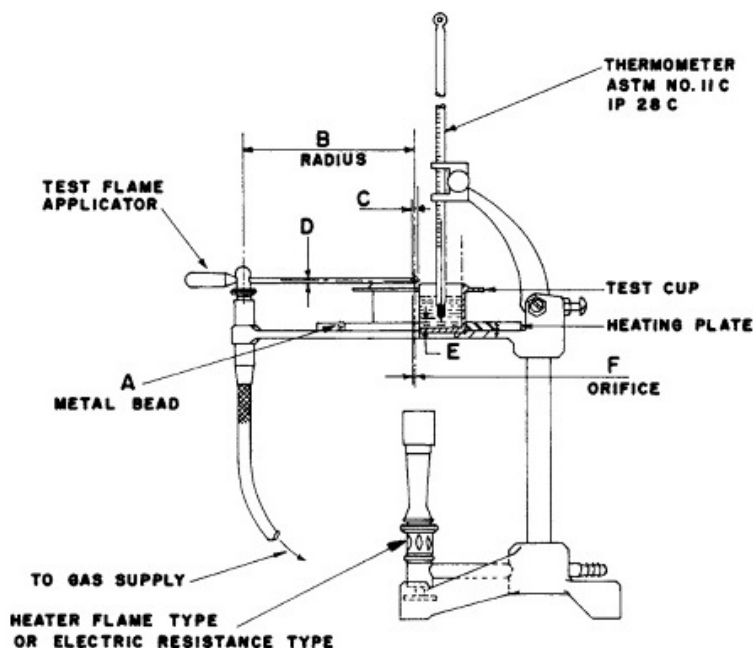
Obr. 2.1: Princip určení viskozitního indexu; převzato z [28]

$L$  je olej s  $VI = 0$ .  $H$  je olej s  $VI = 100$ .  $U$  je olej zkoumaný.

### 2.1.2 Bod vzplanutí a bod hoření

Bod vzplanutí je definován jako teplota, při níž jsou páry nad zkoumaným vzorkem natolik koncentrované, že po přiložení zkušební plaménku dočasně vzplanou. Podle bodu vzplanutí dělíme kapaliny do čtyř tříd hořlavosti (viz. příloha B.1). Čím nižší je bod vzplanutí, tím snáze dojde k inicializaci ohně. Postup stanovení je normován, přičemž jednotlivé normy označují různé měřicí metody (ASTM D56, ISO-2719, ČSN EN ISO 1523, ČSN EN ISO 3679 atd.) [6].

Bod vzplanutí se může lišit podle metody měření, je tedy vhodné při uvedení bodu vzplanutí, uvést i metodu, kterou byl zjištěn. Metody jsou v základě dvě - metoda otevřeného kelímku a metoda uzavřeného kelímku. Tyto metody byly postupem času různě upravovány a proto se dnes lze setkat s několika variantami testování. Zmínit lze metody např. Clevelandova otevřeného kelímku, Penskyho-Martensova uzavřeného kelímku, Rovnovážná metoda v uzavřeném kelímku atd.



**Obr. 2.2:** Clevelandova metoda otevřeného kelímku pro stanovení bodu vzplanutí i bodu hoření (ČSN EN ISO 2592); převzato z [23]

Bod hoření je nejnižší teplota, při které zkoumaný vzorek oleje po zažehnutí zkušebními plaménkem vzplane a hoří po určitou dobu (zpravidla 5 s). Bod hoření je vždy vyšší než bod vzplanutí. Postup stanovení uvádí normy (ASTM D92, ASTM D 1310, ISO 2592)[6].

### 2.1.3 Bod tekutosti

Je teplota, při níž je zkoumaná látka za podmínek stanovených normou již natolik pevná, že přestane téci. Stanovení bodu tekutosti (dříve též bod tuhnutí) se provádí opakovaným zkoumáním stavu látky za postupného snižování teploty. Jedná se o důležitý parametr z hlediska popisu nízkoteplotního chování oleje [6]. Pro zajištění správné funkce elektrického zařízení i za nízkých teplot, se bod tekutosti pohybuje nízko. Jmenovitě např. -56, -48, -30 °C. Bodem tekutosti se zabývá norma ČSN ISO 3016.

### 2.1.4 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti je spojováno se stárnutím izolačního oleje. Při stárnutí dochází v oleji ke zvyšování obsahu kyselých látek. Tyto látky pak způsobují narušení izolačního systému; např. pevnost celulózy, koroze kovů atp. Číslo kyselosti pak vyjadřuje, kolik je třeba mg hydroxidu draselného (KOH) pro neutralizaci kyselých složek v jednom gramu oleje. Slouží tedy často k posouzení stupně zestárnutí oleje [7]. Číslo kyselosti u nových, nepoužitých olejů nabývá nízkých hodnot, jmenovitě např: 0.01, 0.03, 0.04  $\frac{mg\ KOH}{g}$ .

Stanovením čísla kyselosti se zabývá norma ČSN EN 62021 - „Izolační kapaliny - Stanovení čísla kyselosti“ (verze 1 a 2 pro minerální oleje, verze 3 pro ostatní) [8].

### 2.1.5 Oxidační stabilita

Oxidační stabilita je komplexním parametrem, který nám podává informaci o chování oleje za působení degradačních mechanismů. Jedná se o zkoušky, jenž mají napodobit provozní podmínky, kterým bývá olej vystaven. Zkoumaný vzorek bývá podroben zvýšené teplotě, přítomnosti kyslíku, mědi a případně elektrickému poli. Následně se porovnávají některé parametry oleje před a po testu oxidační stability. Vyhodnocuje se např. číslo kyselosti, ztrátový činitel, množství vzniklých kalů atd. Test oxidační stability z hlediska životnosti oleje, nelze brát zcela směrodatně, neboť se mohou lišit jednotlivé zkušební metody (normy) např. v teplotě a době trvání zkoušky. Zároveň v provozu budou panovat odlišné podmínky [7, 19].

Některé zkušební metody ke zjištění oxidační stability, pro izolační kapaliny na bázi uhlovodíků, popisují normy ČSN EN 61125 - „*Nové izolační kapaliny na bázi uhlovodíků - Zkušební metody na vyhodnocování oxidační stálosti*” [9], ČSN EN 62770 - „*Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení*” [18].

### 2.1.6 Obsah vody

Obsah vody v izolačních olejích je nežádoucím jevem. Voda se do oleje může dostat především vlhkostí z okolí nebo důsledkem oxidace, čímž pak může způsobit značné škody (snížení elektrické pevnosti, přeskoky napětí, částečné výboje, rychlejší tvorba kalů, snížení životnosti oleje atd.).

Uvažujme např. klasický VN transformátor s izolačním systémem olej-papír. Transformátor se již při konstrukci/komplementaci vysouší, aby se co nejvíce snížila vlhkost v izolaci vinutí. Dále olej je vháněn do uzavřené nádoby pod tlakem, aby se zamezilo přístupu vlhkosti ze vzduchu. Veškerá manipulace s olejem se provádí tak, aby se co nejvíce zamezilo vniknutí vlhkosti [44, 79].

V izolačním systému olej-papír je voda přítomna hlavně v pevné izolaci, odkud se s rostoucí teplotou rozpouští do oleje. Při chladnutí voda migruje zpět do pevné izolace. I po vysušení transformátoru, je zde přítomna vlhkost asi do 2% váhy izolačního systému. Mohou to být tedy i *kg* vody [12].

Voda se v transformátoru může vyskytovat v několika různých podobách. Nejdůležitější jsou její formy: rozpuštěné, emulgované a volné. Zjednodušeně popsáno [7, 20, 21]:

- Voda **rozpuštěná** závisí na teplotě, druhu oleje a jeho stupni zestárnutí. Platí, že s rostoucí teplotou se zvyšuje množství vody, které se v oleji může rozpustit.
- Voda **emulgovaná** je složena z mikroskopických kapek, které utvářejí emulzi. Vzniká v případě, kdy se přestane voda v oleji rozpouštět (došlo k přesycení).
- Voda **volná** je oproti vodě emulgované natolik koncentrovaná, že se dokáže oddělit z oleje a vytváří kapičky, které se usazují na dně nádoby, kde se mohou shlukovat.

## 2.2 Elektrické vlastnosti

Mezi elektrické vlastnosti řadíme průrazné napětí, elektrickou pevnost, ztrátový činitel, relativní permitivitu, izolační odpor, vnitřní rezistivitu, konduktivitu atd.

Mimo jiné lze tyto veličiny rozčlenit podle použitého napětí při měření jejich velikosti, a tedy [7]:

a) Stejnoseměrné metody:

- izolační odpor  $R$
- vnitřní rezistivita  $\rho$
- polarizační index  $p_i$

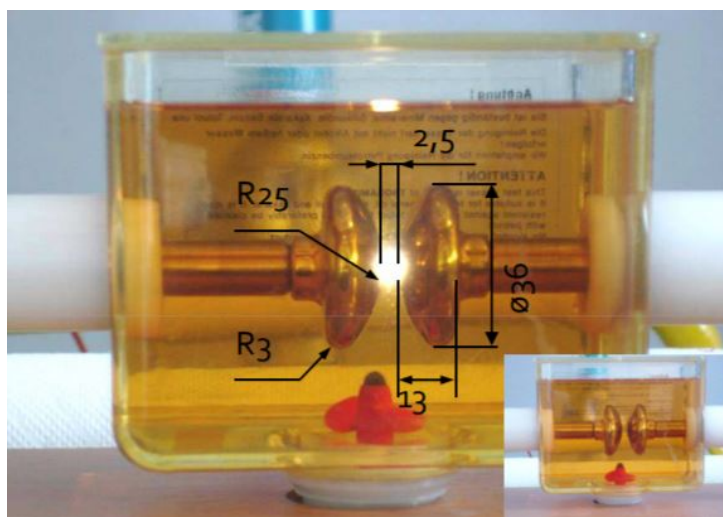
b) Střídavé metody:

- přeskokové napětí  $U_P$
- relativní permitivita  $\varepsilon_r$
- ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$

### 2.2.1 Přeskokové napětí

Přeskokové napětí definujeme jako hodnotu napětí, při které dojde k porušení dielektrika, a tedy přeskoku napětí mezi elektrodami.

Pro jeho určení se řídíme normou ČSN EN 60156 - „Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda” [10].



**Obr. 2.3:** Nádoba pro měření přeskokového napětí dle ČSN EN 60156; převzato z [44]

Přeskokové napětí v kapalných izolantech záleží především na čistotě izolačního média. Vyskytují-li se v kapalině nečistoty, kaly, voda, vzduchové či plynové bublinky atd., dochází ke snížení elektrické pevnosti.

Elektrická pevnost úzce souvisí s přeskovým napětím. Platí mezi nimi tento vztah:

$$E_P = \frac{U_P}{d} \quad \left[ \frac{kV}{mm}; \frac{kV}{mm} \right] \quad (2.3)$$

kde:  $E_P$  ... elektrická pevnost

$U_P$  ... přeskové napětí

$d$  ... vzdálenost zkušebních elektrod

Pro nové nepoužité oleje, bývá elektrická pevnost  $> 70 \text{ kV}$ , při  $d = 2.5 \text{ mm}$ .

## 2.2.2 Relativní permitivita

Je materiálovou konstantou, která vyjadřuje míru polarizace dané látky. Vyšší hodnota permitivity  $\varepsilon$  znamená vyšší ovlivnění elektrického pole, ve smyslu jeho oslabení. U elektroizolačních kapalin se hodnota  $\varepsilon_r$  pohybuje mezi  $2 \div 4$ . Hodnota relativní permitivity je dána rovnicí 2.4.

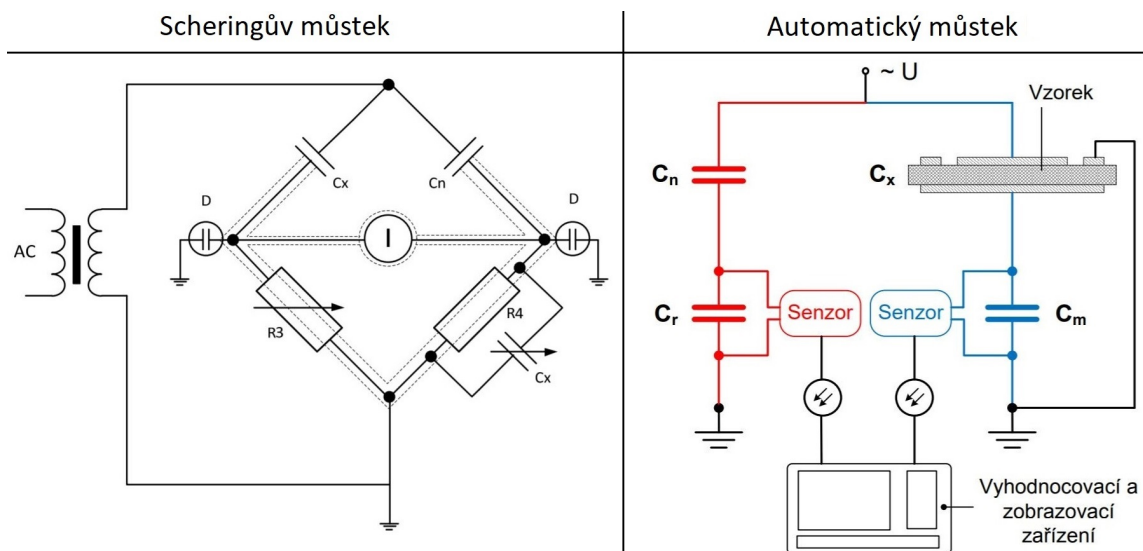
$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad \left[ -; \frac{F}{F} \right] \quad (2.4)$$

kde:  $\varepsilon_r$  ... relativní permitivita

$C_x$  ... kapacita nádoby s měřeným vzorkem oleje

$C_0$  ... kapacita prázdné nádoby

K jejímu zjištění se využívá Scheringův můstek (viz obr. 2.4), metoda čtyřkapacitního můstku [14] nebo automatické můstky [44].



Obr. 2.4: Ukázka zapojení Scheringova a automatického můstku; převzato z [7, 45]

### 2.2.3 Ztrátový činitel

Jedná se o bezrozměrnou veličinu, kterou vyjadřujeme kvalitu daného dielektrika, resp. ztráty v daném dielektriku. U kapalných izolantů jde především o ztráty vodivostní a polarizační [7, 19].

- **Vodivostní** ztráty se vyskytují jak u nepolárních čistých, tak u zestárých polárních olejů s nečistotami. Jejich velikost je určena vodivostí dielektrika, která roste s vyšší teplotou. Závislost ztrátového činitele na teplotě má exponenciální růst a na frekvenci má klesající charakter.
- **Polarizační** ztráty se projevují u látek, ve kterých jsou přítomné nečistoty, příměsi a různé polární látky. Polarizační ztráty jsou rovněž závislé na teplotě a frekvenci.

Ztrátový činitel je ovlivněn teplotou, frekvencí, obsahem příměsí a nečistot, typem dielektrika, intenzitou el. pole apod. [7] Značíme jej  $tg \delta$  a obecně platí, že čím nižší hodnota, tím je méně ztrátové dielektrikum.

Určováním ztrátového činitele se zabývají např. normy ČSN IEC 250, ČSN EN 60247 [11]; dále pak mezinárodní IEC 61620:1998 [15]. V praxi se používají k určení  $tg \delta$  můstkové metody, pro vyšší kmitočty (nad  $kHz$ ) metody rezonanční. V současnosti jsou tyto měřící metody inovovány tak, aby byly co nejpřesnější a jejich použití nejjednodušší. Nejčastěji je pro měření  $tg \delta$  použit Scheringův můstek [14].

### 2.2.4 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivitu  $\rho_v$  lze nejnázne popsat pomocí elektrické vodivosti  $\gamma$ , která je v izolačních kapalinách nežádoucí vlastností. Mezi těmito veličinami platí následující vztah:

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma} \quad \left[ \Omega \cdot m; S/m \right] \quad (2.5)$$

kde:  $\rho_v$  ... vnitřní rezistivita

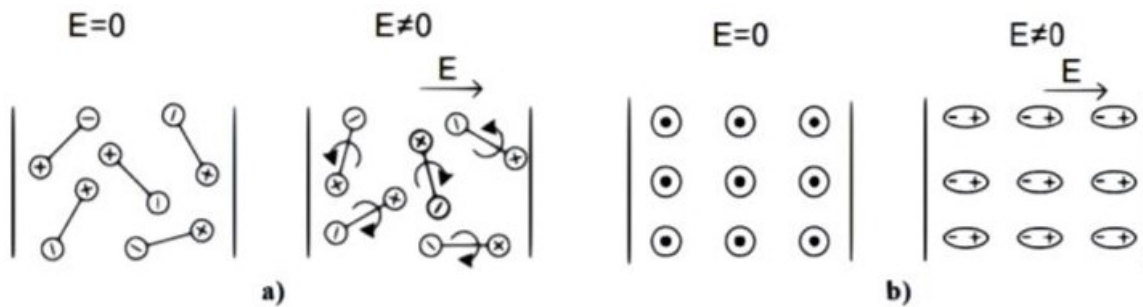
$\gamma$  ... konduktivita

Vodivost je zde závislá na několika faktorech např. vlhkosti, obsahu nežádoucích částic, teplotě, velikosti měřícího napětí atp. Vnitřní rezistivita s rostoucí teplotou klesá, což je způsobeno zvýšenou pohyblivostí iontů, která roste s teplotou kapaliny [19, 43]. Důležitou roli zde hraje i strukturální stavba daného materiálu (jak již bylo naznačeno u ztrát v 2.2.3), kdy rozlišujeme látky polární a nepolární [14]:

- **Polární** látky mají větší dielektrické ztráty, kvůli přítomnosti nejrůznějších příměsí a nečistot polárního charakteru. Molekuly těchto látek, mají i bez působení vnějšího elektrického pole vlastní dipólový moment.



- **Nepolární** látky jsou postihnuty pouze ztrátami vodivostními. Nepolární látky nemají mimo působení elektrického pole vlastní dipólové momenty. Ty se utvoří až po vložení dielektrika do elektrostatického pole (viz obr. 2.5)



**Obr. 2.5:** Působení vnějšího elektrického pole na dielektrikum: a) polární b) nepolární; zdroj [22]

Obecně se za izolant považují materiály s vodivostí  $\gamma < 10^{-9} S/m$ . Dále lze podle velikosti vodivosti dělit izolanty na [14]:

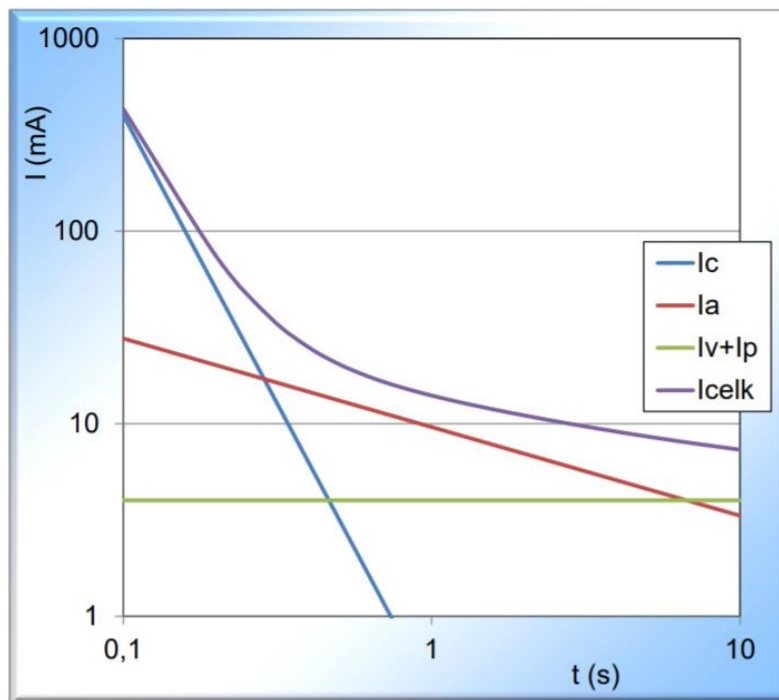
- **Technicky čisté:**  $\gamma \approx 10^{-11} \div 10^{-12} S/m$ ; kde jsou volné nosiče elektrického náboje různého charakteru, záleží zde na příměsích a velikosti částic
- **Extrémně čisté:**  $\gamma \approx 10^{-14} \div 10^{-15} S/m$ ; obsahují velmi malé množství volných nosičů náboje.

Měření lze opět provést dle normy ČSN EN 60247 [11], případně také dle americké ASTM D1169 - 11 [15].

## 2.2.5 Polarizační index

Je parametrem, kterým vyhodnocujeme stav, obecně kterékoliv, izolace. Provádí se pomocí konstantního stejnosměrného napětí a je využito skutečnosti, že po přiložení napětí se izolační odpor  $R_i$  s časem zvyšuje. To je způsobeno proudem, který je složen z různých složek; viz obr. 2.6. Celkový proud  $i_{celk}$  má tyto složky [16]:

- **Kapacitní**  $i_c$  - závislý na tvaru a uspořádání vodiče a na vnitřním odporu zdroje napětí. Tímto proudem je nabíjena kapacita dané izolace.
- **Absorpční**(či polarizační)  $i_a$  - je důsledkem polarizace dielektrika. Tento proud může klesat až několik hodin.
- **Vodivostní**  $i_v$  - protéká izolací. Její velikost je závislá na izolačních schopnostech daného materiálu.
- **Povrchovou**  $i_p$  - teče povrchem izolačního materiálu a je dán jeho čistotou. Materiály s čistějším povrchem mají tento proud nižší.



**Obr. 2.6:** Zobrazení celkového proudu a jeho dílčích složek ; převzato z [16]

Při určování polarizačního indexu  $p_i$  je měřen proud, ze kterého se dopočítá izolační odpor [79]. Měření probíhá ve dvou po sobě jdoucích časových intervalech, přičemž je nutné zohlednit o jaký polarizační index se jedná. Obvykle se měří jednodeminutový a desetiminutový  $p_i$  [17]. Standardní časové intervaly jsou 15, 60, 600 s.

Polarizační index jednodeminutový  $p_{i60}$ , je dán podílem zjištěných izolačních odporů:

$$p_{i60} = \frac{R_{i60}}{R_{i15}} \quad \left[ -; \frac{\Omega}{\Omega} \right] \quad (2.6)$$

kde:  $p_{i60}$  ... jednodeminutový polarizační index

$R_{i60}$  ... izolační odpor 60 sekund po začátku měření

$R_{i15}$  ... izolační odpor 15 sekund po začátku měření

Obdobně pak desetiminutový  $p_{i600}$ :

$$p_{i600} = \frac{R_{i600}}{R_{i60}} \quad \left[ -; \frac{\Omega}{\Omega} \right] \quad (2.7)$$

Jednodeminutový  $p_i$  se využívá u menších zařízení, desetiminutový  $p_i$  u větších strojů [79]. Celkové vyhodnocení  $p_i$  se pak řídí tabulkou:

**Tab. 2.2:** Stav izolace podle velikosti polarizačního indexu  $p_i$  ; převzato z [17]

$p_i$	$\geq 4,0$	2,0 až 4,0	1,0 až 2,0	$\leq 1,0$
kritérium stavu izolace	výborná	dobrá	nebezpečí	špatná

# 3

## Minerální olej a jeho náhrady

Náhradou se zde rozumí různé varianty olejů přírodních či syntetických. V dalších podkapitolách jsou představeny požadavky pro minerální elektroizolační kapaliny uváděné na trh, následované výčtem některých komerčních alternativních kapalin s popisem jejich parametrů.

### 3.1 Obecné požadavky na minerální oleje

Ještě před samotným porovnáváním by bylo vhodné uvést obecné informace a požadavky na minerální oleje. K tomu je nejspíše vhodné využít normy ČSN EN 60296 - „*Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité minerální izolační oleje pro transformátory a vypínače*“ [56].

**Tab. 3.1:** Vybrané vlastnosti nepoužitého minerálního oleje; zdroj [56]

VLASTNOST	ZKUŠEBNÍ METODA	MEZNÍ HODNOTY	
		TRAFO olej	Nízkoteplotní olej do vypínačů
viskozita při 40°C [ $mm^2/s$ ]	ISO 3104	max. 12	max. 3,5
viskozita při -30°C [ $mm^2/s$ ]	ISO 3104	max. 1800	-
viskozita při -40°C [ $mm^2/s$ ]	IEC 61868	-	max. 400
bod tekutosti [°C]	ISO 3016	max. -40	max. -60
bod vzplanutí PMCC [°C]	ISO 2719	min. 135	min. 100
hustota při 20 °C [ $g/ml$ ]	ISO 3675 / ISO 12185	max. 0,895	
číslo kyselosti [ $mgKOH/g$ ]	IEC 62021-1 nebo 62021-2	max. 0,01	
obsah vody [ $mg/kg$ ]	IEC 60814	max. 30 <sup>A</sup> ÷ 40 <sup>B</sup>	
přeskokové napětí [ $kV$ ]	IEC 60156	min. 30 ÷ 70 <sup>C</sup>	
ztrátový činitel při 90 °C	IEC 60247 / IEC 61620	max. 0,005	
vzhled	-	Čirý, bez sedimentů a suspendovaných látek	

- kde: **A** - pro dodávku v cisternách  
**B** - pro dodávku v sudech a IBC kontejnerech  
**C** - po laboratorní úpravě

V této normě je uvedeno mnohem více parametrů s příslušnými zkušebními metodami jako např. obsah PCB, celkový obsah síry, obsah korozivní síry, inhibitory, oxidační stabilita, jiná aditiva atd. Zaměřme se nyní na některá srovnání, která lze nalézt u výrobců.

### 3.2 Výrobce M&I - porovnání olejů MIDEL

Jedny z nejznámějších používaných olejů jsou oleje MIDEL 7131 a MIDEL eN 1204. První uvedený olej je syntetický ester, druhý přírodní vyroben z řepky. Výrobce udává porovnání těchto olejů s obecně blíže nespécifikovaným minerálním olejem (viz tab. 3.2). Použité zkušební metody jsou shodné s tab. 3.4

**Tab. 3.2:** Porovnání olejů MIDEL 7131 a MIDEL eN 1204 s minerálním olejem; zdroj [57]

VLASTNOST	MIDEL 7131	MIDEL eN 1204	Minerální olej
snadno/plně biodegradabilní	√	√	×
viskozita při 100 °C [ $mm^2/s$ ]	5,3	8,3	2,6
viskozita při 40 °C [ $mm^2/s$ ]	29	37	8,7
viskozita při 0 °C [ $mm^2/s$ ]	233	232	70
viskozita při -20 °C [ $mm^2/s$ ]	1440	1485	400
bod tekutosti [°C]	-56	-31	< -50
bod vzplanutí PMCC [°C]	260	> 260	150
bod vzplanutí COC [°C]	275	> 315	160
hustota při 20 °C [ $g/cm^3$ ]	0,97	0,92	0,88
číslo kyselosti [ $mgKOH/g$ ]	< 0,03	≤ 0,04	≤ 0,01
obsah vody [ $mg/kg$ ]	50	50	10
přeskokové napětí $U_P$ [ $kV/2,5mm$ ]	>75	> 75	> 70
ztrátový činitel při 90 °C	< 0.008	< 0.03	< 0.001

Kromě oleje MIDEL eN 1204 se vyrábí také MIDEL eN 1215. Oba tyto oleje jsou rostlinného původu. První olej je vyráběn z řepky, druhý ze sóji. Hlavním rozdílem je bod tuhnutí, který je u řepkového oleje nižší o 13 °C, než je tomu u sójového. Jejich použití je vhodnější u hermetizovaných zařízení [57].

MIDEL 7131 byl představen v 70. letech 20. století, přičemž zde lze spatřit souvislost s nahrazováním PCB olejů, či ropnou krizí. Od té doby byl prověřen mnoha izolačními systémy jako vyhovující. Výrobce udává jeho použitelnost v transformátorových aplikacích až do 433 kV. Důležitá je, z hlediska environmentální ochrany, jeho snadná biodegradabilita a neagresivní chování při styku s vodním prostředím. Také má vysoký bod hoření

o hodnotě  $> 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zároveň je vysoká jeho teplota samovznícení  $435\text{ }^{\circ}\text{C}$  [21]. Rostlinné oleje MIDEL mají bod hoření  $> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  (minerální cca  $160 \div 170\text{ }^{\circ}\text{C}$  - metoda COC). To zaručuje zvýšenou požární bezpečnost [57].

Dalším kladem je prodloužení životnosti papírové izolace transformátoru, díky schopnosti extrakce vody z celulózy. Při přechodu vody do oleje je, v jistých mezích, zachována jeho elektrická pevnost. MIDEL 7131 má vyšší míru nasycení než rostlinné oleje MIDEL (2700 vs 1100 ppm při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [57].

### 3.3 Výrobce Cargill - porovnání olejů Envirotemp

Výrobce Cargill vyvinul dvě izolační kapaliny, které se aplikují v elektrotechnice. Jedná se o přírodní Envirotemp FR3 a syntetický ester Envirotemp 200.

**Tab. 3.3:** Srovnání olejů Envirotemp FR3 a FR 200; zdroj [58]

VLASTNOST	ZKUŠEBNÍ METODA	FR3	FR 200
viskozita při $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	ISO 3104	$7,7 \div 8,3$	5,6
viskozita při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	ISO 3104	$32 \div 34$	30
viskozita při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	ISO 3104	190	240
viskozita při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	ISO 3104	-	1450
bod tekutosti [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ISO 3016	$-18 \div -23$	$< -45$
bod vzplanutí PMCC [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ISO 2719	255	$> 250$
bod vzplanutí COC [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ISO 2592	$320 \div 330$	270
bod hoření [ $^{\circ}\text{C}$ ]	ISO 2592	$350 \div 360$	$> 300$
hustota při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	ISO 3675 / ISO 12185	0,92	0,972
číslo kyselosti [ $\text{mgKOH}/\text{g}$ ]	IEC 62021	$0,013 \div 0,042$	0,01
obsah vody [ $\text{mg}/\text{kg}$ ]	IEC 60814	$4 \div 50$	$< 90$
přeskokové napětí [ $\text{kV}$ ]	IEC 60156	73	$> 60$
ztrátový činitel při $90\text{ }^{\circ}\text{C}$	IEC 60247 / IEC 61620	0,02	
rezistivita při $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ $\text{G}\Omega\cdot\text{m}$ ]	IEC 60247	-	10

Envirotemp FR3 je vyroben z obnovitelných přírodních zdrojů, díky čemuž je snadno biodegradabilní, netoxický, neobsahuje halogeny, silikony ani síru. Také má velmi malou tzv. uhlíkovou stopu, která vyjadřuje prostor, jenž potřeba pro vstřebání (asimilaci) emisí oxidu uhličitého. Tento prostor je vyjádřen ve standardizovaných jednotkách globálních hektarů (gha) [60]. Výrobce udává  $56\times$  menší uhlíkovou stopu oproti minerálnímu oleji, během celého životního cyklu. Dojde-li k úniku kapaliny ve volném prostředí, škody a cena nápravy jsou minimální. Další výhodou je absorpce vody z celulózy izolačního systému transformátoru (cca 1000 ppm při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), čímž může prodloužit životnost izolace  $5 \div 8\times$ . FR3 je vhodný při použití nedaleko vodních toků, parků, v hustě obydlených oblastech atp. Také se osvědčil v transformátorech do  $420\text{ kV}$ . Vyhovuje standardu IEC 62770 [58].

Envirotemp 200 je vhodný pro použití v nehermetizovaných, či trakčních transformátorech s nuceným oběhem chladiva. Má velmi dobrou termální i oxidační stabilitu a vyšší bod hoření. Je klasifikován jako snadno biologicky rozložitelný a nepůsobí nebezpečně ve vodě a zemině. Envirotemp 200 může absorbovat mnohem více vody než minerální oleje (2700 ppm vs  $55 \div 60$  ppm pro minerální olej), při zachování elektrické pevnosti cca do hodnoty 600 ppm. Absorpce vody z celulózy snižuje rychlost stárnutí izolačního systému. Při případné termální dekompozici nedochází k produkci nebezpečných látek. Vyhovuje standardu IEC 61099 [58].

### 3.4 Výrobce Clearco Products - olej STO-50

Americká firma Clearco Products dodává na trh olej STO-50. Jedná se o silikonový olej vyvinutý speciálně pro používání v transformátorech. Výrobce udává jeho chemické složení jako 100% Polydimethylsiloxan (viz kap. 1.2.3) [46].

**Tab. 3.4:** Parametry silikonového oleje STO-50; zdroj [46]

VLASTNOST	STO-50
viskozita při 25 °C [ $mm^2/s$ ]	50
bod tekutosti [°C]	< -50
bod vzplanutí COC [°C]	> 300
bod hoření COC [°C]	> 370
hustota při 25 °C [ $g/ml$ ]	0,96
číslo kyselosti [ $mgKOH/g$ ]	< 0,02
obsah vody [ $mg/kg$ ]	< 50
přeskokové napětí [ $kV$ ]	50
ztrátový činitel při 25 °C	0,0001
vzhled	křišťálově čistý

STO-50 je charakteristický především širokým rozsahem pracovních teplot, nízkým tlakem par, malou změnou viskozity při extrémně vysokých a nízkých teplotách. Je chemicky inertní, samozhášecí a neobsahuje žádná aditiva. Dále má vysokou termálně oxidační stabilitu a nízkou toxicitu. Jeho užití je vhodné především v distribučních transformátorech, jenž jsou instalovány uvnitř či v blízkosti budov. Také lze užít v pulzních transformátorech, železničních, transformátorech elektrostatických odlučovačů, kapacitorech a mnoho dalších součástí např. v radarové či televizní technice [46].

### 3.5 Výrobce Savita - olej bioTRANSOL HF

Indický výrobce Savita již více jak 40 let navrhuje elektroizolační kapaliny pro použití v transformátorech. Kromě řady nejrůznějších minerálních olejů, vyvinul také izolační

olej Biotransol HF, přírodní ester vyrobený z obnovitelných surovin. Tento olej je snadno biologicky rozložitelný, netoxický a má sníženou uhlíkovou stopu. Díky jeho slučitelnosti se životním prostředím jsou sníženy škody a náklady na nápravu při případném úniku kapaliny. Biotransol HF dosahuje vysokých hodnot bodu vzplanutí a bodu hoření, které značně snižují možnost jeho vznícení. Jeho další výhodou je přejímání vody z pevné části izolace transformátoru, čímž prodlouží její životnost (a celého transformátoru) [59]. Parametry viz tab. 3.5

**Tab. 3.5:** Technické údaje pro přírodní olej bioTRANSOL HF; zdroj [59]

VLASTNOST	ZKUŠEBNÍ METODA	ČSN EN 62770 <sup>A</sup>	Biotransol HF
viskozita při 100 °C [ $mm^2/s$ ]	ISO 3104	$\leq 15$	7,2 ÷ 8,5
viskozita při 40 °C [ $mm^2/s$ ]	ISO 3104	$\leq 50$	32 ÷ 35
bod tekutosti [°C]	ISO 3016	$\leq -10$	-15 ÷ -18
bod vzplanutí COC [°C]	ISO 2592	-	320 ÷ 330
bod hoření [°C]	ISO 2592	$> 300$	350 ÷ 360
hustota při 20 °C [ $g/cm^3$ ]	ISO 3675	$\leq 1$	0,92
číslo kyselosti [ $mgKOH/g$ ]	IEC 62021-3	$\leq 0,06$	0,03
obsah vody [ $mg/kg$ ]	IEC 60814	$\leq 200$	$< 50$
přeskokové napětí [ $kV$ ]	IEC 60156	$\geq 35$	70
ztrátový činitel při 90 °C	IEC 60247	$\leq 0,05$	0,02 ÷ 0,03

kde: **A** - limitní hodnoty podle ČSN EN 62770 [18]

Pro výše uvedené důvody je vhodné jeho použití na místech se zvýšeným ohledem vůči životnímu prostředí. Dále také v obydlených oblastech a na místech kde požadujeme vysokou protipožární ochranu [59].

# 4

## Možnosti dalšího rozvoje elektroizolačních kapalin

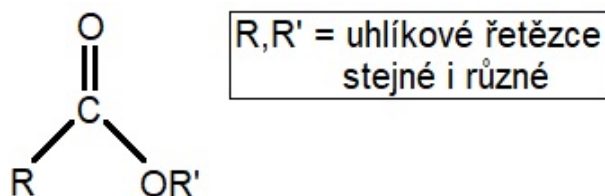
Pro vytyčení způsobů dalšího rozvoje je důležité pochopit základní mechanismy elektroizolačních kapalin. Tyto mechanismy jsou samozřejmě odlišné podle typu zvoleného kapalného izolantu. Text podkapitoly 4.1 poukazuje na některé tyto odlišnosti u alternativních kapalin, načež navážou možnosti pro další zlepšení a vývoj.

### 4.1 Rozdíly vybraných vlastností kapalných izolantů

#### 4.1.1 Chemická struktura

Jak bylo již uvedeno v kap. 1.2, minerální oleje jsou komplexní sloučeninou mnoha uhlovodíků [26]. Naproti tomu přírodní estery sestávají ze směsi esterů, glycerinů a nasycených i nenasycených mastných kyselin [34, 35]. Následující řádky popisují strukturu používaných esterů [61]:

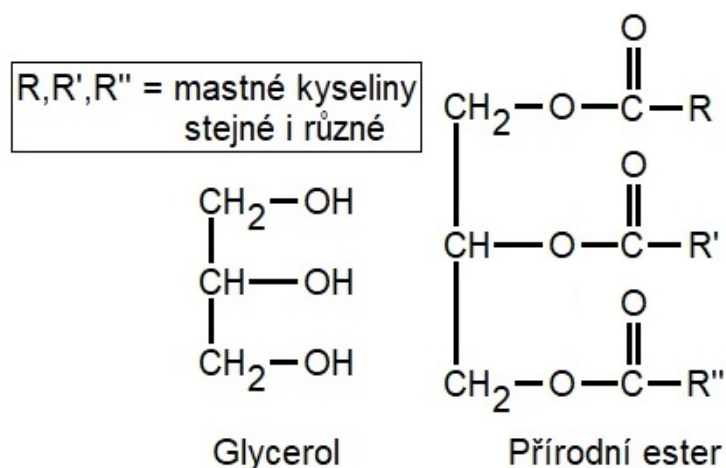
- Termín **ester** pochází z chemické vazby, která vzniká reakcí alkoholu a mastné kyseliny. Obecná struktura esteru viz obr. 4.1



**Obr. 4.1:** Ukázka strukturálního uspořádání obecného esteru; zdroj [61]

- **Přírodní estery** mají strukturu založenou na glycerolu, přesněji řešeno se jedná o triglyceridy, na který navazují tři obvykle se vyskytující mastné kyseliny v rostlinných olejích [63]. Mastným kyselinám se později věnuje text v kap. 4.1.3. Tyto estery jsou přirozenou částí životního cyklu všech rostlin.

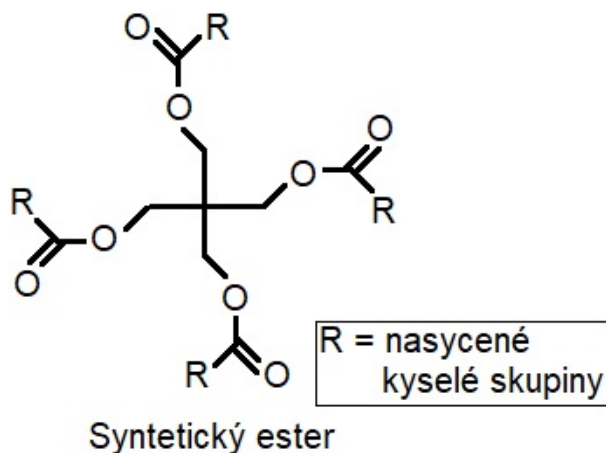




**Obr. 4.2:** Ukázka strukturálního uspořádání přírodního esteru; zdroj [61]

Výhodou přírodních esterů je vysoký bod vzplanutí a hoření a jejich biodegradabilita. Slabou stránkou je jejich oxidační stabilita.

- **Syntetické estery** jsou obvykle produktem polyolu (alkoholu obsahující dvě a více hydroxylových skupin) a přírodní či syntetické karboxylové kyseliny. Výsledkem je struktura s několika kyselými skupinami (obvykle 2 ÷ 4), jež jsou navázány na polyol. Použité kyseliny jsou většinou nasycené (pouze jednoduché vazby v uhlíkovém řetězci), čímž zajišťují velmi stabilní chemickou strukturu.



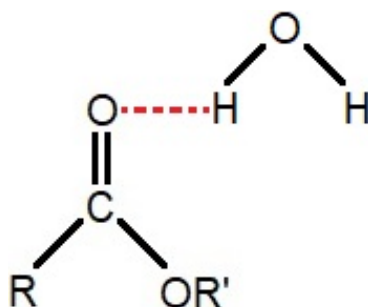
**Obr. 4.3:** Ukázka strukturálního uspořádání syntetického esteru; zdroj [61]

Příklad struktury silikonového oleje je uveden v kap. 1.2.3

#### 4.1.2 Obsah vlhkosti

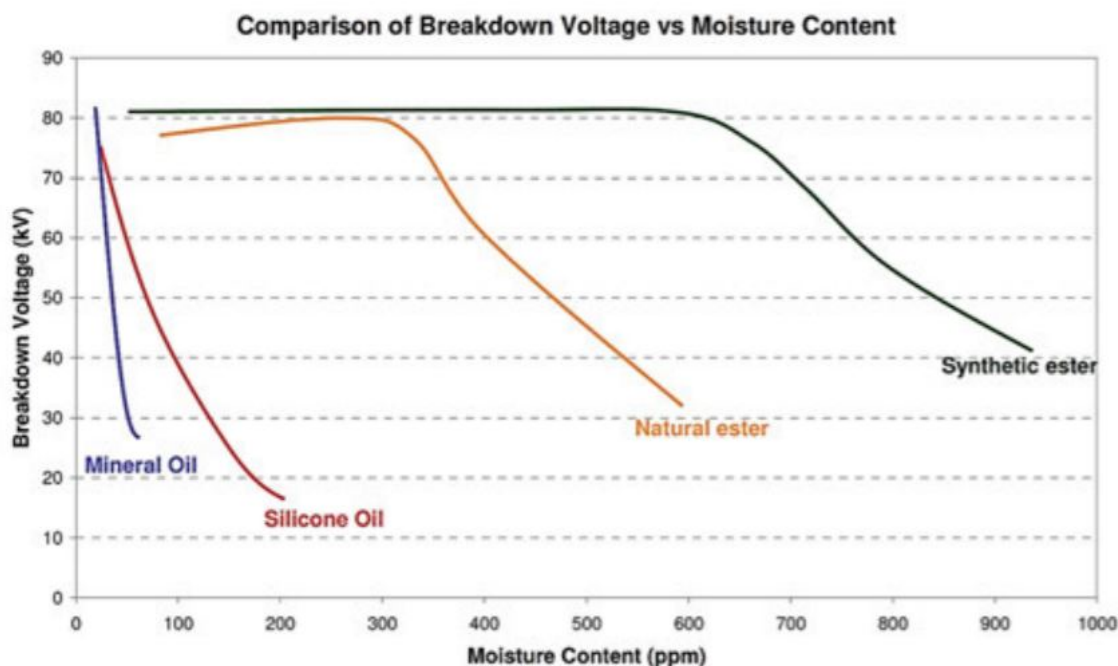
Vlhkost je v izolačních kapalinách přítomna v několika formách, přičemž nejdůležitější je rozpuštěná, emulgovaná a volná (viz kap. 2.1.6). Podíváme-li se blíže na chemickou strukturu přírodních esterů zjistíme, že na sebe dokážou navázat, větší množství vody než

oleje minerální. Stejně tak je tomu u esterů syntetických. Důležité je, že se nejedná přímo o vázání vody na molekuly esterů, jako spíše o jejich přitažení [61]. Způsob přitahování vody k esteru je na obr. 4.4



**Obr. 4.4:** Způsob přitahování vody k esteru; zdroj [61]

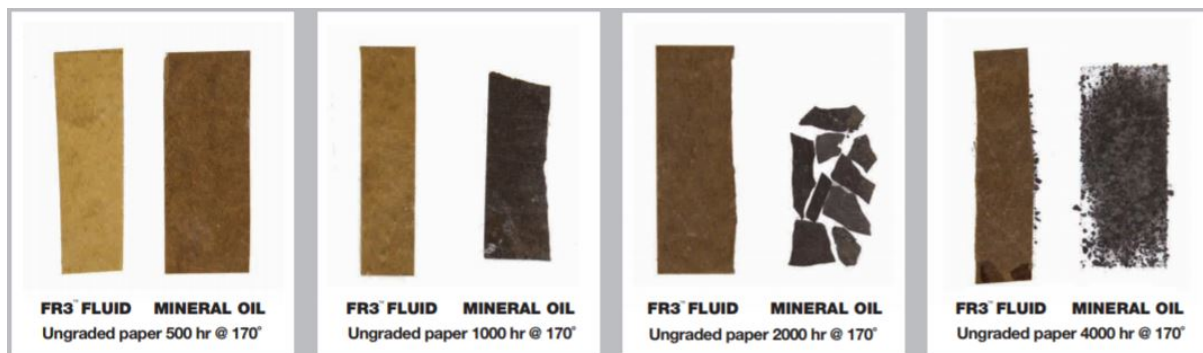
Jak je patrné z obr. 4.4, přitahování molekul vody u přírodních a syntetických esterů je možné právě díky jejich esterovým vazbám, takže se v nich voda může rozpouštět snáze. Souvislost mezi esterovými vazbami a obsahem vlhkosti je také patrná z tabulky 4.1. Naproti tomu minerální oleje a silikonové kapaliny nemají esterové vazby a jsou tedy velmi citlivé na celkový obsah vody (viz obr. 4.5) [61, 83]:



**Obr. 4.5:** Vliv obsahu vlhkosti na přeskovové napětí různých typů izolačních kapalin (pokojová teplota); převzato z [61]

Jinými slovy řečeno, minerální i silikonové oleje jsou hydrofobní (tzn. nerozpustnost ve vodě), takže většina vody zůstává v papírové izolaci. Zatímco přírodní i syntetické estery jsou hydrofilní (tzn. rozpustnost ve vodě), tudíž je voda absorbována kapalinou pryč z pevné izolace [58, 83].

Na tuto skutečnost je několikrát poukázáno u komerčních zástupců v kap. 3, kdy dovoluje prodloužení životnosti celulózy v izolačním systému transformátoru; viz obr. 4.6



**Obr. 4.6:** Životnost celulózy během termálního stárnutí u oleje FR3 a minerálního oleje; převzato z [58]

Tato vlastnost umožňuje několik změn u transformátorů jako např. prodloužení jejich životnosti, zmenšení rozměrů, vyšší provozní teploty, menší provozní náklady atp. [57, 58, 79]

Rozpustnost vody v transformátorových olejích, tedy obsah vody před počátkem tvorby volné vody, s ohledem na počet esterových vazeb v jedné molekule oleje ukazuje tab. 4.1:

**Tab. 4.1:** Přibližné hodnoty pro nasycení transformátorových olejů vodou; zdroj [61]

OLEJ	ESTEROVÉ VAZBY	NASYCENÍ VODOU PŘI 23 °C [ppm]
Minerální	0	55
Silikonový	0	220
Přírodní ester	3	1100
Syntetický ester	2 ÷ 4	2600

### 4.1.3 Oxidační stabilita

**Oxidační stabilita** je u alternativních kapalin velice komplexní záležitostí, především pak u kapalin přírodních [61].

- U **silikonových kapalin** dochází k oxidaci velmi pomalu, při teplotách  $> 175$  °C.
- **Syntetické estery** též podléhají oxidaci velmi pomalu, při teplotách  $> 125$  °C, kdy produkují organické kyseliny.
- **Minerální oleje** oxidují již při teplotách  $> 105$  °C. Jejich oxidací vzniká mnoho degradačních produktů.
- **Přírodní estery** podléhají oxidaci nejnáze ze všech elektroizolačních kapalin; viz. následující text.

Oxidační stabilita přírodních esterů je dána jejich chemickým složením, konkrétně vyvážením mastných kyselin, které zaujímají místo v jejich struktuře. V přírodních olejích lze nalézt zhruba 10 společných mastných kyselin, kdy většinou převažují nenasycené nad nasycenými. Míra nasycených či nenasycených kyselin zároveň ovlivňuje bod tekutosti. Platí, že čím vyšší je míra nenasycených kyselin, tím nižší je bod tekutosti a oxidační stabilita (viz tab. 4.2)[61, 63].

**Tab. 4.2:** Skladba mastných kyselin u některých zástupců rostlinných olejů; zdroj [61]

OLEJ	MASTNÉ KYSELINY						
	NASYCENÉ				MONO- NENASYC.	POLY- NENASYC.	
	LAUROVÁ C12:0	MYRISTOVÁ C14:0	PALMITOVÁ C16:0	STEAROVÁ C18:0	OLEJOVÁ C18:1	LINOLOVÁ C18:2	ALFA- LINOLENOVÁ C18:3
KOKOSOVÝ	47	18	9	3	6	2	-
PALMOVÝ	-	1	45	4	40	10	-
ARAŠÍDOVÝ	-	-	11	2	48	32	-
OLIVOVÝ	-	-	13	3	71	10	1
SÓJOVÝ	-	-	11	4	24	54	7
SEZAMOVÝ	-	-	9	4	41	45	-
SLUNEČNICOVÝ	-	-	7	5	19	68	1
SLUNEČNICOVÝ <sup>A</sup>	-	-	3 ÷ 5	3 ÷ 6	75 ÷ 85	8 ÷ 10	-
SAFLOROVÝ	-	-	7	2	13	78	-
ŘEPKOVÝ	-	-	4	2	56	22	10
KANOLOVÝ	-	-	4	2	62	22	10

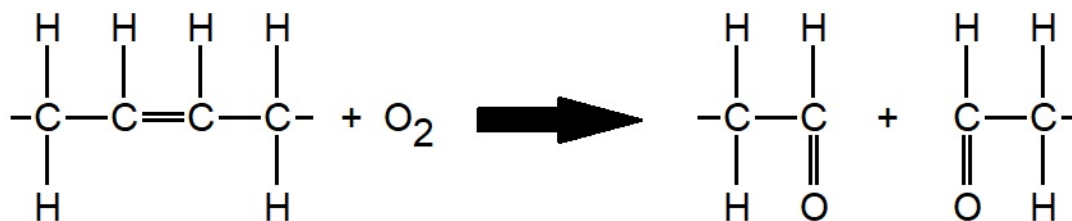
Pevný stav —————→ Kapalný stav

Oxidační stabilita —————→ Oxidační nestabilita

kde: **A** - olej s vysokým obsahem kyseliny olejové

Dále bylo zjištěno[61, 63]:

- Oxidaci snáze podléhají dvojně vazby uhlíkového řetězce, které se vyskytují u nenasycených kyselin (viz obr. 4.7). Více dvojných vazeb znamená rychlejší oxidaci.
- Oxidační proces je nevratný a s jeho postupem se zvyšuje viskozita oleje.
- Oxidace je urychlena kovovými částicemi, světlem a volnými radikály



Obr. 4.7: Proces oxidace mastné kyseliny v přírodním oleji; zdroj [62]

#### 4.1.4 Bod tekutosti

Bod tekutosti se u přírodních olejů pohybuje relativně vysoko, což je dáno, jak již bylo řečeno výše, mírou nasycených či nenasycených kyselin obažených v oleji. U olejů, kde převládají nasycené kyseliny se pohybuje nad 0 °C. U nenasycených olejů se může pohybovat v rozmezí -15 ÷ -30 °C. Nižšího bodu tekutosti než je -30 °C nedosáhnou ani po přidání depresantů. Toto se může jevit jako nevýhoda, avšak díky struktuře přírodního oleje, kdy jednotlivé mastné kyseliny mrznou při rozdílných teplotách, nedochází k příliš rychlým změnám skupenství. Díky tomu je zamezeno vzniku prasklinek a vzduchových mezer, které by mohli usnadnit vznik částečných výbojů, resp. narušit elektrickou pevnost [63]. Princip působení depresantů v přírodních olejích je popsán v kap. 4.2. Syntetické estery a silikonové oleje mají bod tekutosti nižší -45 °C.

#### 4.1.5 Biodegradabilita

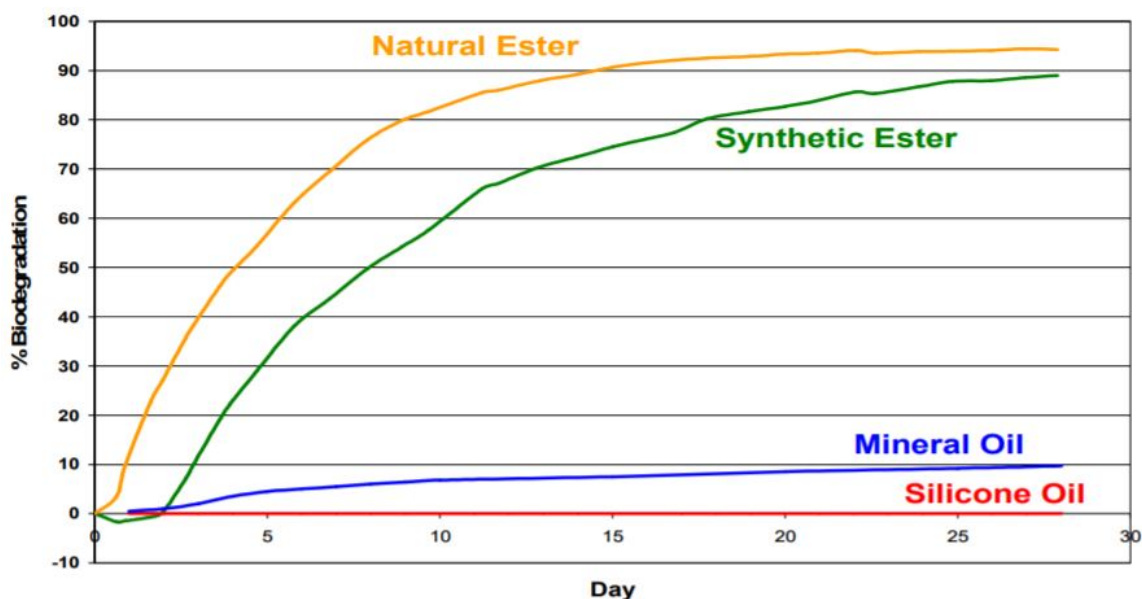
Jedním ze současných trendů na poli elektroizolačních kapalin je výroba kapalin, které by svým působením byly nezávadné vůči životnímu prostředí. Tento trend je spojen s tzv. biodegradabilitou, tedy schopností biologického rozložení kapaliny ve volné přírodě.

U přírodních esterů může být biodegradabilita z hlediska oxidační stálosti nevýhodou. Vystává zde technický paradox, kdy se snažíme mít kapalný izolant, který bude odolávat degradačním mechanismům a zároveň by měl být snadno odbouratelný, aby v případě nehody nedošlo k ekologické katastrofě [79].

K otestování biodegradability jsou prováděny série zkoušek (OECD 301), kdy je simulován únik kapaliny do vody či půdy [61, 63]. Kapaliny jsou vyhodnoceny jako snadno biodegradabilní, splňují-li následující kritéria[61]:

- 60 % biodegradace se musí projevit do 10 dní po překročení 10 % degradace
- alespoň 60 % degradace se musí objevit do 28. dne testování

Jako snadno biodegradabilní jsou vyhodnoceny přírodní a syntetické estery, což lze pozorovat u komerčních zástupců v kap. 3. Nejvhůře biologicky odbouratelné jsou oleje minerální a silikonové; viz obr. 4.8

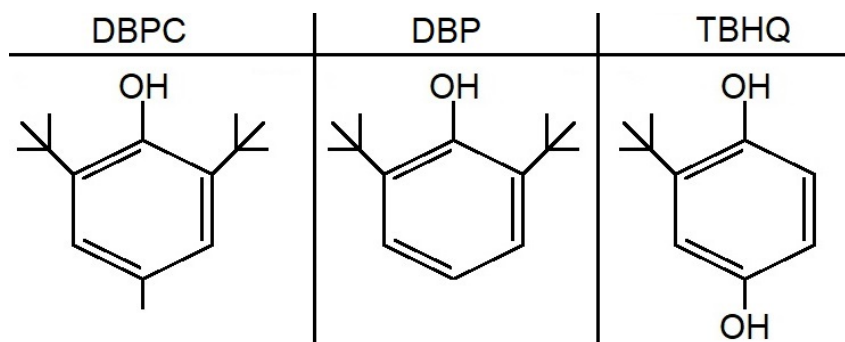


Obr. 4.8: Biologická odbouratelnost používaných elektroizolačních kapalin; převzato z [61]

## 4.2 Aditiva, inhibitory

Inhibitory slouží v oblasti elektroizolačních olejů jednak ke zlepšení vlastností, a zároveň k prodloužení jejich životnosti. Podobně chápeme nejrůznější aditiva, která se ve spojení s těmito oleji užívají. Vhodně zvolená aditiva a jejich poměr v perspektivních elektroizolačních kapalinách jsou jistě důležitým bodem, kterým se je třeba zabývat pro další vývoj. Dále je uveden obecný přehled některých suplementů, se kterými se můžeme setkat [38, 44, 69]:

- a) **inhibitory oxidace** (antioxidanty) - mají zabránit podléhání oleje oxidačním procesům a s tím spojeným zhoršením vlastností. Zavedeny jsou tedy pro zlepšení oxidační stability. Příkladem antioxidantu může být organická sloučenina DBPC (BHT) - Butylhydroxytoluen  $C_{15}H_{24}O$  [69]. Jiným příkladem může být např. DBP - 2,6-di-terc-butyl-fenol  $C_{14}H_{22}O$  [69] a TBHQ - terciální butylhydrochinon  $C_{10}H_{14}O_2$  [68]. Chemickou strukturu znázorňuje obrázek 4.9.

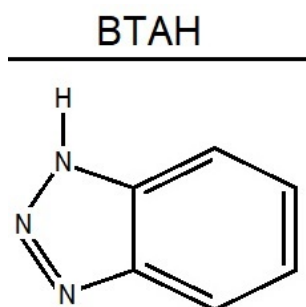


Obr. 4.9: Chemická struktura antioxidantu DBPC, DBP a TBHQ; zdroj[76]

U přírodních esterů, jejichž oxidační stabilita je silně spjata s bodem tekutosti, nebyli běžně používané DBPC a potravinové antioxidanty dostatečně vhodné. Začali se používat antioxidanty založené na fenolech a aminech. Důraz by měl být kladen na množství antioxidantu v oleji, neboť větší množství by negativně ovlivnilo jeho parametry. Množství aditiv by v oleji nemělo přesáhnout 1 % hmotnosti oleje [63, 69].

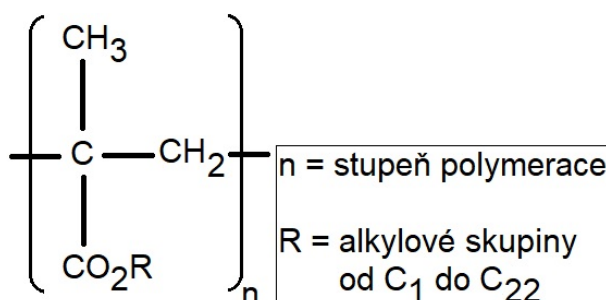
Vyčerpání antioxidantu v oleji souvisí se snížením povrchového napětí, prudkým zvýšením čísla kyselosti a produkcí kalů. Často se používají v kombinaci s pasivátory (viz následující text) [69].

- b) **inhibitory koroze** (pasivátory, blokátory/deaktivátory kovů) - uvažujeme je ve spojení s povrchy kovů (typicky u nádob a vinutí transformátorů), kde svým působením vytvářejí na povrchu kovu vrstvu filmu, která zabraňuje korozi. Ta je způsobena např. korozivní sírou, jež je obsažena v minerálním oleji. Míra koroze je snížena dle typu kovu a dle okolního prostředí. Dále zabraňují rozpouštění mědi do oleje, kde by negativně ovlivňovala jeho vlastnosti [21]. Jako inhibitory koroze se používají bráněné polyfenoly, alkyl fenyl aminy a deriváty triazolu [69]. Příkladem může být Benzotriazol (BTA, BTAH)  $C_6H_5N_3$  (viz obr. 4.10) a jeho deriváty [61, 77].



**Obr. 4.10:** Strukturální vzorec benzotriazolu; zdroj [77]

- c) **depresanty** - zavedeny již ve 30. letech 20. stol. pro zlepšení nízkoteplotního chování izolační kapaliny. Mají za úkol snížit bod tekutosti. Prvními depresanty byly tzv. poly alkyl methakryláty (PAMA, PMA), používané u parafinických olejů. V různých podobách jsou používány dodnes [64, 65, 66].



**Obr. 4.11:** Strukturální vzorec poly alkyl methakrylátu - PAMA; zdroj [64]

Pro dobrou efektivitu PAMA je důležité, aby alkylová skupina R byla lineární a obsahovala alespoň 14 atomů uhlíku [64, 66]. Depresanty používané u minerálních olejů lze použít i u přírodních esterů, avšak jejich účinnost je omezena. V minerálních olejích je bod tekutosti obecně závislý na množství parafinických látek (dlouhé uhlovodíkové řetězce). V přírodních olejích tyto látky přítomny nejsou, neboť zde jsou dlouhé řetězce mastných kyselin [65, 66].

Princip fungování depresantu u přírodních esterů je následující. Při snižování teploty dochází postupně k tuhnutí látky, což je způsobeno krystalizací, která vede ke zvýšení viskozity. Při krystalizaci vznikají tzv. krystalizační jádra (zárodky) - nuklea. Postup krystalizace může být potlačen pokud nuklea nedosáhnou tzv. kritické velikosti. Nedojde-li k dosažení kritické velikosti, zárodek je nestabilní a proces krystalizace je možné zvrátit. Depresanty nedokážou zabránit vzniku krystalů, avšak mohou potlačit jejich růst, a tedy vznik velkých krystalů během tuhnutí. Tento proces lze označit jako kokrystalizace s molekulami triglyceridů [66].

Obvykle je potřeba větší množství depresantu než u minerálních olejů [65]. Pro přírodní oleje jsou vhodné depresanty PAMA a dále kopolymery styrenu a maleinanhydridu (PSMA) viz obr. 4.13 [66].

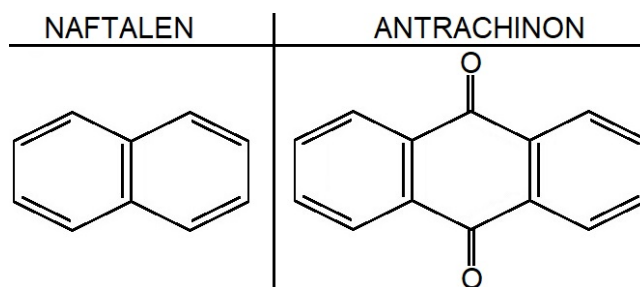
**Tab. 4.3:** Vliv PAMA a PSMA na bod tekutosti [°C] vybraných přírodních olejů; zdroj [67]

PŘÍRODNÍ OLEJ	ČISTÝ PŘÍRODNÍ OLEJ	PAMA 1 hm%	PSMA 1 hm%
Sójový	-9	-18	-18
Slunečnicový	-12	-24	-24
Kanolový	-18	-33	-36

Tabulka 4.3 ukazuje podobný vliv obou zmiňovaných depresantů. PAMA jsou vyráběny ve vyšším množství a mají nižší cenu než PSMA, proto jsou více rozšířené [65, 66]. Přírodní estery mají bod tekutosti max. -30 °C. Nižší hodnoty nedosáhneme ani po zvýšení koncentrace depresantu [63].

- d) **vodíkové akceptory** - jsou aditiva pro optimalizaci plynování oleje, které může být způsobeno výbojovou činností, poruchami či vyšší provozní teplotou. Plynování oleje lze definovat jako chemický rozklad uhlovodíků při tepelném a elektrickém namáhání. Při zhroucení uhlovodíkového řetězce dojde k uvolnění malého množství plynu a vytvoření většího reaktivního volného radikálu. Kolize těchto volných radikálů způsobuje tvorbu koloidních částic, které nejsou rozpustné v oleji [70]. Jako vodíkové akceptory se používají aromatické uhlovodíky, např. antrachinon, benzofenon, bifenyl, naftalen, tetralin, chinolin atp. [71, 72].

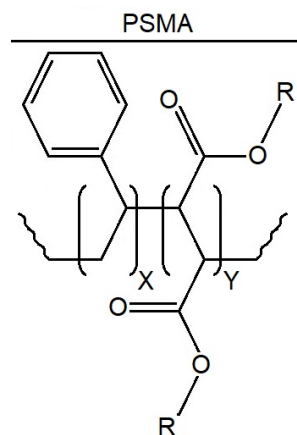




Obr. 4.12: Strukturní vzorec vybraných vodíkových akceptorů; zdroj [78]

Množství uvolněného plynu je tím menší, čím vyšší je obsah aromátů [71]. Tyto látky umožňují upravit olej jako plyn absorbující, či plyn produkující. Zároveň takto mohou ovlivnit elektrickou pevnost [69, 73]. Plyny které vznikají jsou např. vodík, methan, ethan, ethen, ethyn, oxid uhelnatý, oxid uhličitý atp. [71, 74]. V příloze B.2 je uvedena koncentrace plynů po výbojové činnosti u komerčních zástupců elektroizolačních kapalin.

- e) **inhibitory vlhkosti** (různé adsorbenty, molekulární síta atp.) - používají se pro odstranění vlhkosti z oleje, avšak nejsou jeho stálou součástí [79]. Jsou jistou formou zeolitů, které se mimo jiné používají u regenerace oleje (viz kap. 1.4), kde pomáhají odstranit kyselé složky, vodu a oxidační produkty [44]; lze je tedy chápat jako jistou formu filtru.
- f) **aditiva pro úpravu viskozitního indexu (VII)** - podle požadavků lze zvýšit či snížit viskozitní index; to pak umožňuje (podobně jako depresanty) lepší aplikovatelnost. Viskozitní index je popsán na konci kapitoly 2.1.1. Příkladem může opět být PAMA, avšak s rozdílnou relativní molekulovou hmotností  $M_r$  a stavbou monomeru. Monomery u VII mají obsaženy krátké, střední a dlouhé uhlovodíkové řetězce, avšak monomery depresantů obsahují pouze dlouhé řetězce ( $C_{12} \div C_{18}$ ). Depresanty mají  $M_r$  v rozsahu 7 000  $\div$  10 000, VII v rozsahu 250 000  $\div$  750 000 [66]. Podobně může být použit i PSMA, jehož struktura je na obr. 4.13

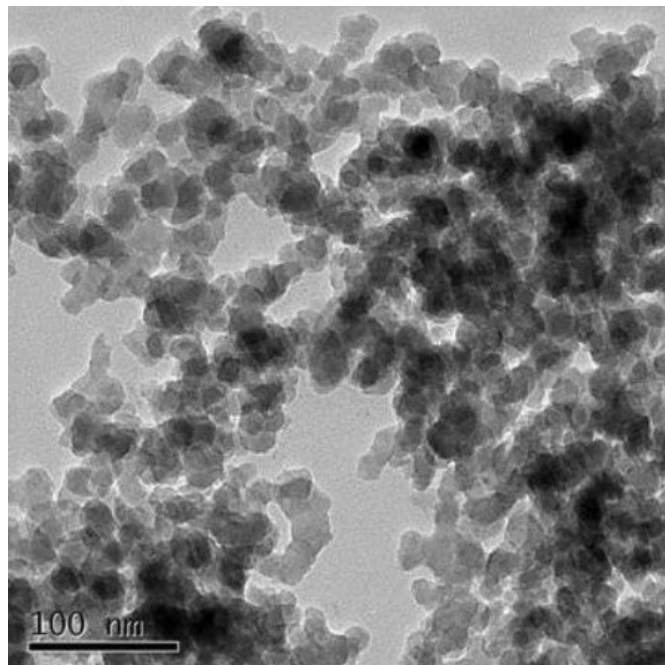


Obr. 4.13: Strukturní vzorec kopolymeru styrenu a maleinanhidridu - PSMA; zdroj [66]

### 4.3 Nanokapaliny

Jde o izolační kapaliny obsahující nanočástice. Použití nanočástic v elektroizolačních kapalinách je relativně novou metodou, kterou lze vylepšit jejich parametry jako např. elektrickou pevnost, ztrátový činitel, rezistivitu, permitivitu, obsah vlhkosti, tepelnou vodivost atp. [80, 82, 83]. Počátek užívání nanočástic proběhl u minerálních olejů [79], u kterých je stále předmětem výzkumu mnoha světových odborníků [80]. Minerální oleje jsou však z ekologického hlediska nepřijatelné, proto se někteří výzkumníci přesouvají k testování u olejů přírodních.

Používané materiály nanočástic jsou např. [79, 80, 81]: ZnO, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\alpha$ ,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CeO<sub>2</sub> atd. Kapaliny s magnetickými částicemi jako např. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, označujeme jako magnetické kapaliny [86]. Strukturu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> můžeme vidět na obr. 4.14



**Obr. 4.14:** Struktura nanočástic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> o velikosti 30 nm a čistotě 99 %; převzato z [87]

Velikost částic se může pohybovat v rozmezí 5 ÷ 120 nm. Reaktivní nanočástice s větší plochou povrchu dokáží snížit obsah vlhkosti v oleji, čímž se zvýší elektrická pevnost [83]. Samotná velikost částic je v nepřímé úměře s přeskokovým napětím, neboť jistý podíl nanočástic se usazuje a tvoří vrstvu na povrchu vzduchových bublinek, které jsou obsažené v oleji. Čím menší jsou nanočástice, tím lépe se tvoří vrstva, bubliny jsou stabilnější a zároveň je potlačen vývoj nových bublin, což zvyšuje přeskové napětí [80]. Dále se zohledňuje čistota nanočástic, která nabývá hodnot  $\geq 98$  %. Také se mohou částice vyrábět v provedeních pro odolnost vůči UV záření či aby měly hydrofilní, nebo lipofilní vlastnosti [80, 88].

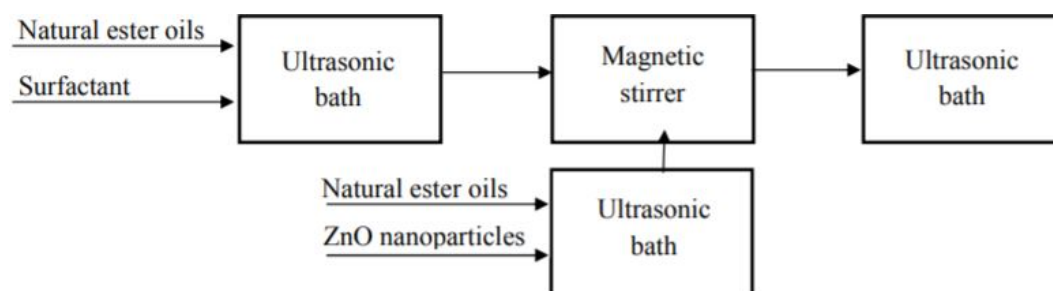
Při použití nanočástic se vyskytuje problém jejich sedimentace a shlukování. Z toho důvodu se částice podrobují vhodné povrchové úpravě, která těmto jevům dokáže bránit

a zlepšuje tak stabilitu suspenze. K povrchové úpravě slouží nejrůznější disperzanty a povrchově aktivní látky (surfaktanty) ve formě kapaliny či prášku jako např. kyselina olejová, myristová, laurová, trifenyfosfin atd. [79, 85]. Kvůli rozdílným strukturám mezi minerálními a přírodními oleji není možné uplatnit stejné metody povrchových úprav na obě tyto kategorie [82].

Proces přípravy nanokapalin je značně komplexní záležitostí, ve které figuruje mnoho proměnných jako je teplota, čas, tlak atp. Dále je uveden zjednodušený postup pro nanokapaliny založené na přírodních esterech [79, 82, 83, 84, 85, 88]:

- **příprava nanočástic** - dochází k povrchové úpravě nanočástic, kdy se kombinuje disperzant s nanočásticemi a ethanolem. Pro zaručení kvalitní povrchové úpravy se směs míchá za působení teploty, což lze realizovat ultrasonickou jehlou, magnetickou míchačkou, rotačním evaporizérem atp. Nakonec se částice vysouší.
- **příprava nanokapaliny** - sloučení modifikovaných nanočástic s elektroizolačním olejem. Tato činnost opět probíhá během promíchávání. Vlhkost může být odstraněna z oleje před i po sloučení s nanočásticemi.
- **odstavení kapaliny** - pro vyprcháání mikrobublinek, které vzniknou při míchání a mohli by ovlivnit její vlastnosti. K tomuto účelu lze využít např. vakuovou pec. Odstavení může být v rozsahu několika hodin až dne.

Např. autoři v [84] použili pro přípravu nanokapaliny se ZnO částicemi, následující postup:



**Obr. 4.15:** Příklad postupu výroby nanokapaliny na bázi přírodního oleje; převzato z [84]

Při použití nanočástic je také důležitá jejich koncentrace v kapalině. V odborné literatuře se většinou setkáme s koncentracemi do 1 % [80, 82, 84, 88]. Vhodná koncentrace je samozřejmě závislá na druhu částic, povrchové úpravě, oleji atd.

# Závěr

V této práci je popsána výroba v praxi používaných elektroizolačních kapalin společně s jejich chemickou strukturou. Prostor je zde věnován oblastem použití, regeneraci minerálních olejů a nadále vybraným elektrickým a fyzikálně-chemickým vlastnostem, dle kterých hodnotíme izolační kapaliny.

Z porovnání minerálních olejů s perspektivními kapalinami vyplývá, že tyto kapaliny mají především mnohem vyšší bod vzplanutí. Přírodní a syntetické estery jsou navíc snadno biodegradabilní a díky svým esterovým vazbám méně citlivé na celkový obsah vlhkosti. Silikonové kapaliny jsou v těchto ohledech podobné olejům minerálním, avšak na druhou stranu mají mnohem lepší oxidační stabilitu. U přírodních esterů, jež podléhají oxidaci nejsnáze, je oxidační stabilita a bod tekutosti závislý na poměru nasycených a nenasycených karboxylových kyselin. Přírodní estery mají oproti ostatním kapalinám bod tekutosti nejvyšší i po přidání depresantu.

Pro zlepšení vlastností je navrženo použití konvenčních aditiv a nanočástic, u kterých je pojednáno o chemickém složení používaných materiálů společně s jejich bližší specifikací. Přehled běžně aplikovaných aditiv odhaluje používání různých látek s aromatickým základem především u antioxidantů, pasivátorů a vodíkových akceptorů. V přírodních esterech je vliv depresantů dán schopností jejich kokrytalizace s molekulami triglyceridů. Látky používané jako depresanty lze aplikovat i pro úpravu viskozitního indexu, avšak je potřeba rozlišit délky řetězců jednotlivých alkylových skupin navázaných na monomery látky. Použitím nanočástic lze, při správné velikosti a koncentraci částic, zlepšit elektrickou pevnost a některé další parametry daného izolačního oleje. Nevýhodou nanočástic je jejich shlukování a sedimentace, což omezujeme užitím vhodné povrchové úpravy jako je např. kyselina olejová.

Z hlediska míry naplnění zadání lze prohlásit, že byly splněny všechny body. O vlastnostech elektroizolačních kapalin pojednávají kapitoly 1 a 2, což odpovídá prvnímu bodu zadání. Druhý bod zadání pokrývají kapitoly 3 a 4.1, kde je provedeno srovnání kapalných izolantů a vytyčení problematických parametrů alternativních izolačních kapalin. Poslední bod zadání, který odpovídá možnostem pro zlepšení těchto parametrů, je popsán v kapitolách 4.2 a 4.3.

# Literatura

- [1] ČSN EN 61039. *Klasifikace izolačních kapalin*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [2] ČSN EN 61100. *Klasifikace izolačních kapalin podle bodu hoření a výhřevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [3] ČERNÝ, Jaroslav. Vlastnosti motorových olejů - Viskozita. In: *Oleje.cz - Svět maziv* [online]. Ústav technologie ropy a petrochemie, VŠCHT Praha, 03.10. 2006 [cit. 2017-09-04]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Viskozita>
- [4] MIKULČÁK, Jiří a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1988.
- [5] ČSN EN ISO 3104. *Ropné výrobky - Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [6] Výkladový slovník. In: *Petroleum.cz* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta technologie ochrany prostředí, Ústav technologie ropy a alternativních paliv, ©2007-2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/slovník.aspx>
- [7] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [8] ČSN EN 62021. *Izolační kapaliny - Stanovení čísla kyselosti*. Praha : Český normalizační institut, 2004.
- [9] ČSN EN 61125. *Nové izolační kapaliny na bázi uhlovodíků - Zkušební metody na vyhodnocování oxidační stálosti*. Praha : Český normalizační institut, 1996.
- [10] ČSN EN 60156. *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. Praha : Český normalizační institut, 1998.
- [11] ČSN EN 60247 . *Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele (tan delta) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
- [12] Zkušební metody: I. Rozbory izolačních olejů. In: *Eldiag s.r.o.* [online]. [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/zkusebni-metody>
- [13] BERAN, Vlastimil. *Technická měření*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1991. ISBN 80-708-2036-5.
- [14] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.

- [15] SCHOBER, Fabian, Andreas KÜCHLER a Christoph KRAUSE. Oil conductivity – an important quantity for the design and the condition assessment of HVDC insulation systems. *FHWS Science Journal*. Würzburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 2014, , 59-78. urn:nbn:de:bvb:863-opus-463.
- [16] PAVLÍK, Josef. *Vybrané problémy z diagnostiky izolačních systémů točivých strojů*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Miloš Hammer.
- [17] SMETANA, Jaroslav. Měření vybraných parametrů izolace. *ELECTRO*. 2009, (8-9), 42-43.
- [18] ČSN EN 62770. *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [19] SCHEJBAL, Václav. *Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*. Plzeň, 2007, 144 s. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Eva Kučerová.
- [20] LEWAND, Lance. Understanding Water in Transformer Systems: The Relationship Between Relative Saturation and Parts per Million (ppm). In: *Trojan Dryout Systems — Power Transformer Oil Care Solutions: Technical Centre* [online]. Spring 2002 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.dryoutsystems.com/technical-centre>
- [21] HEATHCOTE, Martin J. a D. P. FRANKLIN. *The J & P Transformer Book: a practical technology of the power transformer*. 12th ed. Oxford ; Boston: Newnes, 1998. ISBN 978-075-0611-589.
- [22] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. *Fyzika I*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 80-708-0514-5.
- [23] KUSUMA, Dewi. Mandatory information about Cleveland open cup tester on flash point testing. In: *THE WONDER OF CHEMICAL FORMULAS* [online]. 2015-09-24 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://chemicalformulas.blogspot.cz/2015/09/mandatory-information-about-cleveland-OPEN-CUP-TESTER-on-flash-point-testing.html>
- [24] ČSN 65 0201. *Hořlavé kapaliny - Prostory pro výrobu, skladování a manipulaci*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [25] KUSUMA, Dewi. Significance and use of test method for distillation of petroleum product. In: *THE WONDER OF CHEMICAL FORMULAS* [online]. 2015-09-22 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://chemicalformulas.blogspot.cz/2015/09/significance-and-use-of-test-method-for-distillation-of-petroleum-product.html>
- [26] BLAŽEK, Josef. Zpracování ropy: 2. přednáška - Složení ropy, základní schémata zpracování ropy, odsolování a destilace ropy. In: *Vodní zdroje Ekomonitor spol. s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.ekomonitor.cz/seminare/2013-08-14-odborne-vzdelavani-uredniku-pro-vykon-statni-spravy-ochrany-ovzdusi-v-ceske-republice-nadstavbovy-vy>
- [27] Základy výroby minerálních olejů. In: *Petroleum.cz* [online]. VŠCHT Praha [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-34.aspx>
- [28] BLAŽEK, Josef. Zpracování ropy: 6. přednáška Vlastnosti a výroba minerálních olejů. In: *Vodní zdroje Ekomonitor spol. s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.ekomonitor.cz/seminare/2013-08-14-odborne-vzdelavani-uredniku-pro-vykon-statni-spravy-ochrany-ovzdusi-v-ceske-republice-nadstavbovy-vy>

- [29] ČERNÝ, Jaroslav. Když se řekne: základové oleje. In: *Oleje.cz - Svět maziv* [online]. Ústav technologie ropy a petrochemie, VŠCHT Praha [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Kdyz-se-rekne--zakladove-oleje>
- [30] Dorafinace. In: *Petroleum.cz* [online]. VŠCHT Praha [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-40.aspx>
- [31] ČERVINKA, Otakar, Václav DĚDEK a Miloslav FERLES. *Organická chemie: učebnice pro vys. školy chemicko-technologické*. 4. vyd., v Informatoriu 1. vyd. Praha: Informatorium, 1991. ISBN 80-854-2703-6.
- [32] Technologická zařízení. In: *Farmet* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.farmet.cz/cs/oft/technologicka-zarizeni>
- [33] Proces výroby olejů. In: *GLENCORE AGRICULTURE CZECH* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.glencoreagriculture.cz/proces-vyroby-oleju.html>
- [34] HAMERSKÁ, Jarmila. *Rostlinné oleje - spotřebitelská sonda* [online]. Brno, 2011 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/ozq2a/>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Vedoucí práce Halina Matějová.
- [35] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír. *ElectroScope* [online]. Plzeň: Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, 19. Listopad 2007, 2007(1) [cit. 2018-03-29]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c13.pdf>
- [36] Rozdíl mezi nepanenským a panenským olivovým olejem. In: *Jamón.cz: Španělská sušená šunka bez konzervantů* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://jamon.cz/olivovy-olej/1375-rozdil-mez-nepanenskym-a-panenskym-olivovym-olejem>
- [37] MENTLÍK V., PROSR P., PIHERA J., POLANSKÝ R. New Possibilities of the Oil-paper Insulating Systems, 20th Nordic Insulation Symposium, pp. 157-160, ISBN 978-82-519-2232-6, Jun 2007 Kgs. Lyngby, Denmark.
- [38] ERDMAN, Herbert G. *Electrical insulating oils*. Philadelphia: ASTM, c1988. ASTM special technical publication, 998. ISBN 08-031-1179-7.
- [39] The Gale Encyclopedia of Science. Chlorinated Hydrocarbons. In: *Encyclopedia.com* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/chlorinated-hydrocarbons-0>
- [40] FOFANA, I., V. WASSERBERG, H. BORSI a E. GOCKENBACH. Preliminary investigations for the retrofilling of perchlorethylene based fluid filled transformer. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 07 August 2002, 9(1), s. 97-103 [cit. 2018-03-30]. DOI: 10.1109/94.983892. ISSN 10709878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/983892/>
- [41] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [42] POLJAK, F. *Štruktúra a vlastnosti materiálov II*. Edičné stredisko SVŠT Bratislava, 1986. 155 s.

- [43] REŇÁK, Ladislav. *Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/8069>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Martin Frk.
- [44] TRNKA, Pavel. *Výrobní a technologické procesy KET/VTP: III. Přednáška - Transformátor - nádob, výzbroj, doprava*. Plzeň: Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU.
- [45] ŠIRŮČEK, M. a P. TRNKA. Detekce tepelné expozice izolačního systému olej-papír s oleji na bázi přírodních esterů. *ElectroScope* [online]. Plzeň: Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, 10. Květen 2013 [cit. 2018-05-17]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: [http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2013/Cislo2\\_2013/r7c1c5.pdf](http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2013/Cislo2_2013/r7c1c5.pdf)
- [46] Introduction to silicone fluids: Silicones: Unique Chemical Structure. In: *Silicone Oils and Lubricants from Clearco* [online]. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <http://www.clearcoproducts.com/introduction-to-silicone-fluids.html>
- [47] MOHAPATRA, Staish C. An Overview of Liquid Coolants for Electronics Cooling. In: *Electronics Cooling* [online]. May 1, 2006 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.electronic-cooling.com/2006/05/an-overview-of-liquid-coolants-for-electronics-cooling/>
- [48] RAGEH, Hamada. Oil filled Cables. In: *YOUR ELECTRICAL HOME* [online]. Behira, Egypt, August 28, 2011 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <http://www.yourelectrichome.com/2011/08/oil-filled-cables.html>
- [49] VOŠTRÁČEK, Zdeněk. *Elektrické přístroje 1 KEE/EPR1: Elektrické přístroje 1-2: Elektrické spínací přístroje*. Plzeň: Katedra elektroenergetiky a ekologie, Fakulta elektrotechnická, ZČU, c2012.
- [50] Differential Capacitance Pressure Sensors. In: *Learning Instrumentation And Control Engineering: We Provide Tools and Basic Information for Learning Process Instrumentation and Control Engineering*. [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: [http://www.instrumentationtoolbox.com/2011/02/electrical-pressure-sensors-used-in\\_13.html?m=1axzz5BWzuJsfj](http://www.instrumentationtoolbox.com/2011/02/electrical-pressure-sensors-used-in_13.html?m=1axzz5BWzuJsfj)
- [51] SHARMA, Sachin. What is the use of a conservator in transformer?. In: *A place to share knowledge and better understand the world* [online]. 28 May 2016 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-the-use-of-a-conservator-in-transformer>
- [52] URBÁNEK, Libor. *Regenerace elektroizolačních kapalin*. Praha, 2014. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/24909>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Jiří Brázdil.
- [53] Oil regeneration: Oil Reclamation. In: *ABB Group, přední dodavatel digitálních technologií pro průmysl* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/transformers/service/maintenance/preventive-maintenance/oil-regeneration>
- [54] REOIL® Transformer oil regeneration: Description of oil regeneration process. In: *Ekofluid – High vacuum oil treatment and oil regeneration equipment* [online]. [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://www.ekofluid.com/services/transformer-oil-regeneration/>



- [55] KÜHN, Otto. Variabele condensator in olie. *Elektron* [online]. VERON - Vereniging voor Experimenteel Radio Onderzoek Nederland, 01/12/2010, 2010, pp. 527-529 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: [https://www.nonstopsystems.com/radio/frank\\_radio\\_antenna\\_magloop.htm](https://www.nonstopsystems.com/radio/frank_radio_antenna_magloop.htm)
- [56] ČSN EN 60296. *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité minerální izolační oleje pro transformátory a vypínače*. Ed. 2. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [57] MIDEL Selection Guide: Compare MIDEL fluids to choose the one best suited to your requirements. In: *MIDEL* [online]. 2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.midel.com/library>
- [58] Envirotemp dielectric fluids: Our Envirotemp™ dielectric fluid products. In: *Cargill: Provider of food, agriculture, financial and industrial products and services to the world* [online]. 2018 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.cargill.com/bioindustrial/dielectric-fluids>
- [59] BioTRANSOL: TRANSFORMER OIL. In: *Savita Chemicals, Oil Technologies, Petroleum Specialities* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.savita.com/businesses/biotransol-hf.php>
- [60] LAŠŤOVIČKOVÁ, Markéta. *Ekologická stopa města - kritická analýza* [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/eljy4a/>. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ekonomická fakulta. Vedoucí práce Eva Cudlínová.
- [61] CIGRE, Cigré Working Group A2.35. *Technical Brochure 436—Experiences in Service with New Insulating Liquids* Paris, France, October 2010.
- [62] TENBOHLEN, Stefan a Maik KOCH. Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2010, 25(2), s. 825-830 [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2034747. ISSN 0885-8977. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5393041/>
- [63] OOMMEN, T.V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2002, 07 August 2002, 18(1), s. 6-11 [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1109/57.981322. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/981322/>
- [64] Pour Point Depressants: A Treatise on Performance and Selection. In: *Evonik Oil Additives: Your fuel efficiency and lubricant experts* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://oil-additives.evonik.com/sites/lists/re/documentsoa/ppd-treatise-en.pdf>
- [65] RUDNICK, Leslie R., ed. *Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: chemistry and technology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2013. Chemical industries. ISBN 978-143-9855-379.
- [66] BIRESAW, Girma a K.L. MITTAL. *Surfactants in Tribology: Svazek 5*. CRC Press, 2017. ISBN 9781351647144.
- [67] ASADAUSKAS, Svajus a Sevim Z. ERHAN. Depression of pour points of vegetable oils by blending with diluents used for biodegradable lubricants. In: *Journal of the American Oil Chemists' Society* [online]. 1999, 76(3), s. 313-316 [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1007/s11746-999-0237-6. ISSN 0003021X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1007/s11746-999-0237-6>
- [68] BELTRÁN, N., E. PALACIOS a G. BLASS. Potential of Jatropha curcas oil as a dielectric fluid for power transformers. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2017, 33(2), s. 8-15 [cit. 2018-04-26]. DOI: 10.1109/MEI.2017.7866674. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7866674/>

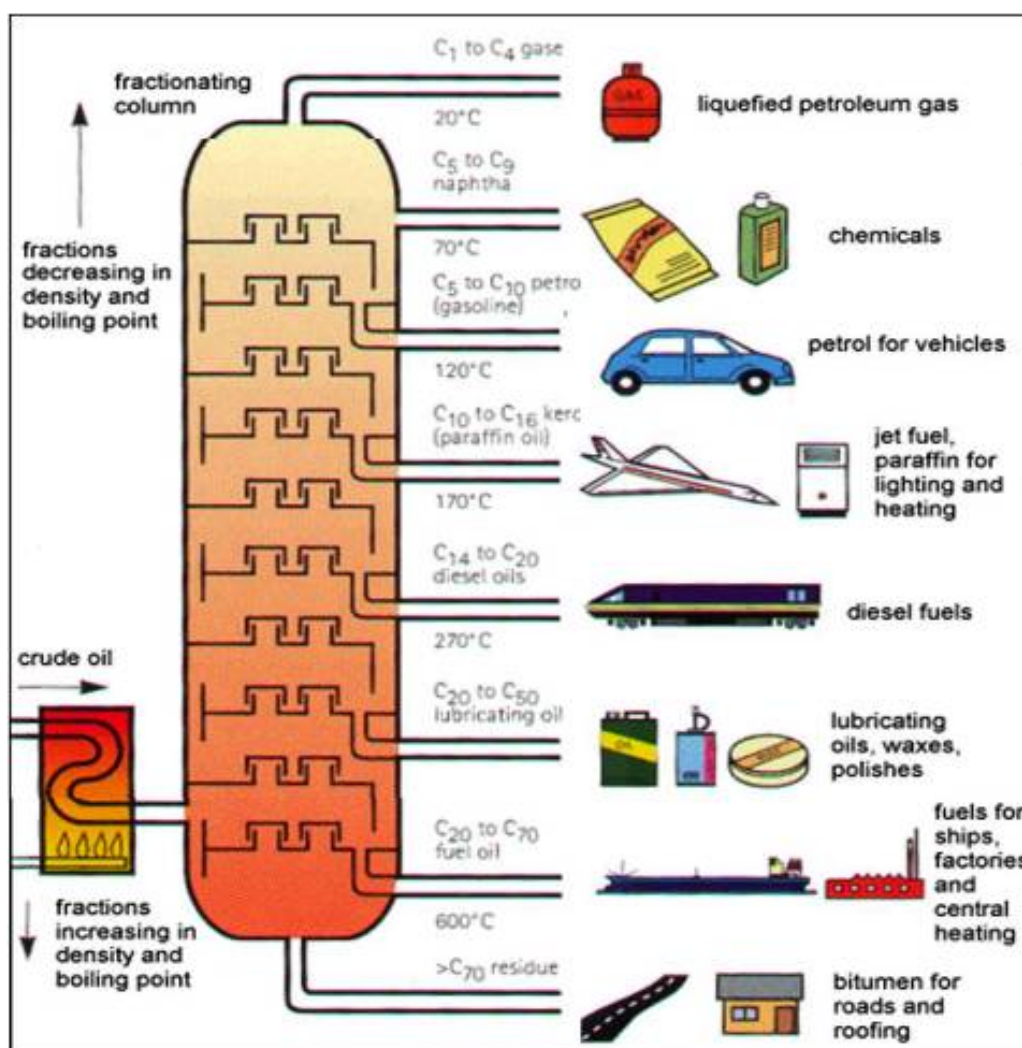
- [69] SIEROTA, A. a J. RUNGIS. Electrical insulating oils. I . Characterization and pre-treatment of new transformer oils. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. Jan.-Feb. 1995, 11(1), s. 8-20 [cit. 2018-04-13]. DOI: 10.1109/57.342040. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/342040/>
- [70] N'CHO, J., I. FOFANA, A. BEROUAL, T. AKA-NGNUI a J. SABAU. The gassing tendency of various insulating fluids under electrical discharge. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 10 October 2011, 18(5), s. 1616-1625 [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.1109/TDEI.2011.6032832. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6032832/>
- [71] ZAKY, Asser a Ibrahim MEGAHED. Effect of Organic Additives, Gas Phase, Stress, and Temperature on the Gassing Characteristics of Insulating Liquids. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* [online]. 1972, EI-7(3), s. 145-152 [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.1109/TEI.1972.299198. ISSN 0018-9367. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4081712/>
- [72] ZAKY, A A, I Y MEGAHED a C EVANGELOU. The effect of organic additives on the breakdown and gassing properties of mineral oils. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 1976, 9(5), s. 841-849 [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.1088/0022-3727/9/5/017. ISSN 0022-3727. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0022-3727/9/i=5/a=017?key=crossref.6bfad63236f174a8108f8820515b496d>
- [73] ANGERER, L. Effect of organic additives on electrical breakdown in transformer oil and liquid paraffin. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* [online]. 1965, 112(5), s. 1025- [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.1049/piee.1965.0177. ISSN 00203270. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1965.0177>
- [74] DUVAL, M. Dissolved gas analysis: It can save your transformer. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 1989, 5(6), s. 22-27 [cit. 2018-05-06]. DOI: 10.1109/57.44605. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/44605/>
- [75] JOVALEKIC, M., D. VUKOVIC a S. TENBOHLEN. Gassing behavior of various alternative insulating liquids under thermal and electrical stress. In: *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [online]. IEEE, 2012, s. 490-493 [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.1109/ELINSL.2012.6251517. ISBN 978-1-4673-0487-0. ISSN 1089-084X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6251517/>
- [76] MILNE, G.W.A., ed. *Gardner's commercially important chemicals synonyms, trade names, and properties*. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2005. ISBN 978-047-1736-615.
- [77] FINŠGAR, Matjaž a Ingrid MILOŠEV. Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review. In: *Corrosion Science* [online]. Jožef Stefan Institute, Department of Physical and Organic Chemistry, Ljubljana, Slovenia, 2010, 52(9), s. 2737-2749 [cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.05.002. ISSN 0010938X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X10002283>
- [78] KANDIYOTI, Rafael, Alan HEROD a Keith BARTLE. *Solid Fuels and Heavy Hydrocarbon Liquids: Thermal Characterization and Analysis*. Elsevier, 2006, 364 s. ISBN 0080463606, 9780080463605. 0065-2660.
- [79] Konzultace s Pavlem Totzauerem. Vedoucí této bakalářské práce. Plzeň 30.4.2018.

- [80] ULRYCH, Jiří. *Aspekty aplikace fluidních systémů* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/u0pmrr/>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Radek Polanský.
- [81] LI, Shanghua, Mattias KARLSSON, Rongsheng LIU, Anwar AHNIYAZ, Andrea FORNARA a Eric Johansson SALAZAR-SANDOVAL. The effect of ceria nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil. In: *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* [online]. IEEE, 2015, s. 289-292 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295265. ISBN 978-1-4799-8903-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7295265/>
- [82] LI, Jian, Zhaotao ZHANG, Ping ZOU, Stanislaw GRZYBOWSKI a Markus ZAHN. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2012, 28(5), s. 43-50 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1109/MEI.2012.6268441. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6268441/>
- [83] DU, Bin, Jian LI, Baimei WANG, Junru XIANG a Zhaotao ZHANG. Influence of water content on the electrical properties of insulating vegetable oil-based nanofluids. In: *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* [online]. Ottawa, Ontario, Canada: IEEE, 2013, 2-5 June 2013, s. 49-51 [cit. 2018-05-03]. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554200. ISBN 978-1-4673-4744-0. ISSN 2334-0975. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6554200>
- [84] SAENKHUMWONG, Wittawat a Amnart SUKSRI. Investigation on Voltage Breakdown of Natural Ester Oils Based-On ZnO Nanofluids. In: *Advanced Materials Research* [online]. 2015, 1119, s. 175-178 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.175. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.1119.175>
- [85] PEPPAS, Georgios D., Aristides BAKANDRITSOS, Vasilis P. CHARALAMPAKOS, Eleftheria C. PYRGIOTI, Jiri TUCEK, Radek ZBORIL a Ioannis F. GONOS. *Ultrastable Natural Ester-Based Nanofluids for High Voltage Insulation Applications* [online]. 2016, 8(38), s. 25202-25209 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1021/acsami.6b06084. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.6b06084>
- [86] LV, Yuzhen, Muhammad RAFIQ, Chengrong LI a Bingliang SHAN. Study of Dielectric Breakdown Performance of Transformer Oil Based Magnetic Nanofluids. In: *Energies* [online]. 2017, 10(7), s. 1025- [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.3390/en10071025. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/1025>
- [87] Iron Oxide: (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 99%, 30 nm). In: *Nanostructured & Amorphous Materials* [online]. Houston, USA: Nanostructured & Amorphous Materials [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.nanoamor.com/inc/sdetail/779>
- [88] Nové elektroizolační kapaliny [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/27956>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Václav Mentlík.

# Příloha A

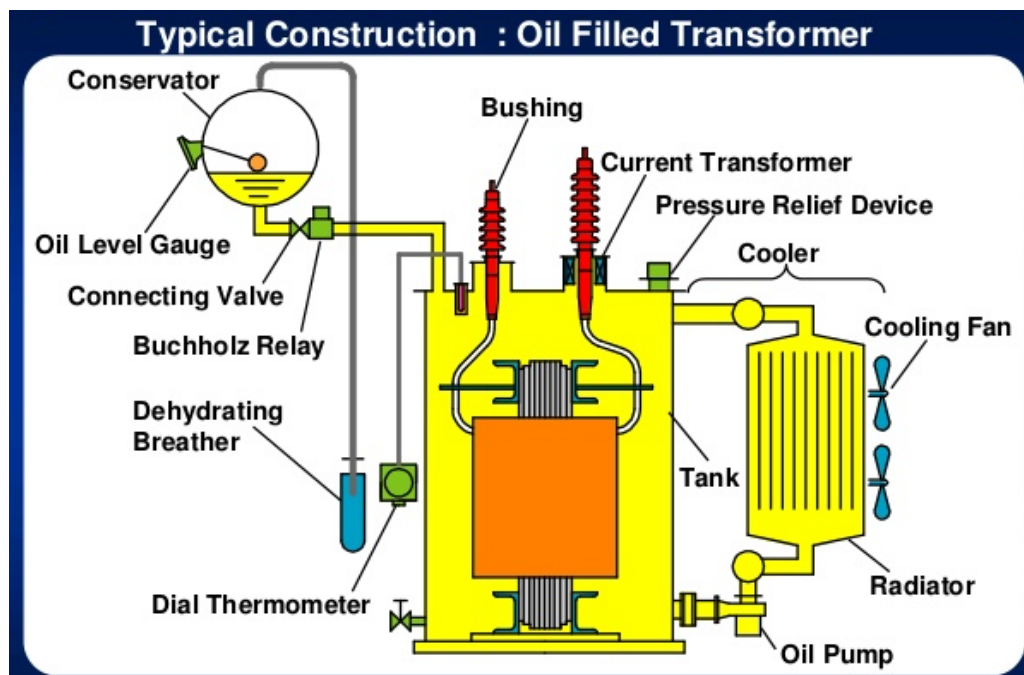
## Obrázky

### A.1 Zjednodušený princip destilace ropy



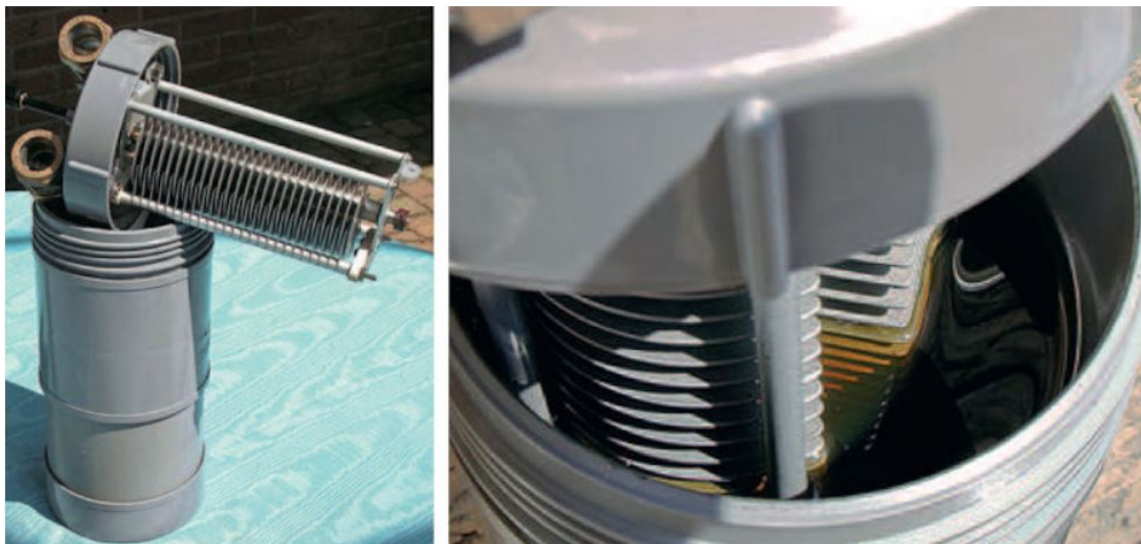
Obr. A.1: Zjednodušený princip destilace ropy; převzato z [25]

## A.2 Olejem plněný transformátor



Obr. A.2: Olejem plněný transformátor; převzato z [51]

## A.3 Proměnný kondenzátor v oleji



Obr. A.3: Proměnný vzduchový kondenzátor v oleji; převzato z [55]

Relativní permitivita oleje je oproti vzduchu minimálně dvojnásobná. Takto lze zvýšit kapacitu a zároveň zlepšit elektrickou pevnost, tzn. omezení částečných výbojů.

# Příloha B

## Tabulky

### B.1 Třídy hořlavých kapalin podle bodu vzplanutí

Tab. B.1: Třídy hořlavých kapalin podle bodu vzplanutí podle ČSN 65 0201[24]

Třída	Bod vzplanutí [°C]	Příklady
I.	do 21	aceton, lehké benzíny, methanol, sirouhlík
II.	nad 21 do 55	lakový benzín, petrolej, styren
III.	nad 55 do 100	motorová nafta, výševroucí petrolej
IV.	nad 100 do 250	topné oleje, anilin, nitrobenzen

### B.2 Koncentrace plynů v oleji

Tab. B.2: Koncentrace plynů v elektroizolačních kapalinách po 90 výbojích; zdroj [75]

OLEJE	KONCENTRACE PLYNŮ PO 90 VÝBOJÍCH V OLEJI [ppm]						
	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
FR3	182	229	953	< 1	99	155	605
MIDEL eN	211	216	891	< 1	94	257	641
MIDEL 7131	318	118	915	< 1	120	308	558
Lyra X	219	214	2100	< 1	155	< 1	1775

Výboje byly realizovány v elektroodovém systému s mezerou elektrod 4 mm a impulsním napětí 134 kV. Oleje byly před počátkem experimentu vysušeny a odplyněny [75]. Lyra X je minerální naftenický olej.