

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Robert RYCHTA**  
Osobní číslo: **E17B0028K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

## Zásady pro vypracování

1. Rozdělte elektroizolační kapaliny dle původu.
2. Proveďte srovnání fyzikálních a elektroizolačních parametrů těchto kapalin.
3. Vyberte kapaliny vhodné pro vybrané aplikace (transformátor, kabel, kondenzátor, vypínač...).
4. Uveďte hlavní degradační mechanismy dle původu a složení elektroizolačních kapalin.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

1. Internetové zdroje, firemní materiály, IEEE Xplore databáze.
2. Mentlík V., Trnka P., a kol. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, Praha 2011.
3. Mentlík a kol., Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Praha 2008.
4. James R.E., Su Q., Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment, IET, ISBN 978-0-86341-737-5, 2008.
5. Mentlík V., Trnka P., Totzauer P, Engineering Dielectric Liquid Applications, pp. 106 -121, MDPI Basel&Beijing, Book Editor: FOFANA I., ISBN 978-3-03897-402-4, 2018, p. 160.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Oponent bakalářské práce: **Ing. Martin Mužík**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



---

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



---

**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

## **ABSTRAKT**

Předmětem této bakalářské práce je shrnutí teoretických poznatků o biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalinách a výběr vhodných zástupců pro využití v transformátorech, kabelech, kondenzátorech a vypínačích.

V první části jsou popsána dielektrika a izolanty a dále také rozdělení kapalin dle původu. V další části je uveden výběr komerčně vyráběných a experimentálních biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin se vzájemným porovnáním jejich vlastností. Dále se práce věnuje popisu jednotlivých degradačních mechanismů struktur elektroizolačních kapalin a ekonomickému hledisku. Závěr práce je zaměřen na výběr konkrétních elektroizolačních kapalin pro vybrané aplikace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

elektroizolant, rostlinný olej, biodegradabilita, elektroizolační kapalina

## **ABSTRACT**

The subject of this bachelor thesis is a summary of theoretical knowledge about biodegradable electrical insulating liquids and the selection of suitable representatives for use in transformers, cables, capacitors and switches.

The first part describes the dielectrics and insulators, as well as the distribution of liquids according to origin. The next part presents a selection of commercially produced and experimental biodegradable electrical insulating liquids with a mutual comparison of their properties. Furthermore, the work deals with the description of individual degradation mechanisms of structures of electrical insulating liquids and the economic aspect. The conclusion of this thesis is focused on the selection of specific electrical insulating liquids for selected applications.

## **KEYWORDS**

Electric insulator, vegetable oil, biodegradability, electrical insulating fluid

## Prohlášení

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

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

.....

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni, kteří mě při vytváření této práce podporovali.

## Obsah

0	Úvod .....	9
1	Dielektrika a izolanty .....	10
1.1	Kapalná dielektrika .....	10
1.1.1	Minerální oleje .....	10
1.1.2	Rostlinné oleje .....	11
1.1.3	Syntetické kapaliny .....	12
1.2	Parametry elektroizolačních kapalin.....	13
1.2.1	Elektrická pevnost.....	13
1.2.2	Ztrátový činitel.....	13
1.2.3	Konduktivita .....	14
1.2.4	Relativní permitivita .....	14
1.2.5	Viskozita .....	14
1.2.6	Barva .....	15
1.2.7	Obsah vody v oleji .....	15
1.2.8	Číslo kyselosti.....	15
1.3	Elektroizolační kapaliny dle využití v zařízeních.....	15
1.3.1	Transformátorové oleje .....	15
1.3.2	Kabelové kapaliny.....	16
1.3.3	Kondenzátorové kapaliny .....	17
1.3.4	Vypínačové kapaliny.....	18
2	Biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny .....	20
2.1	Biologická odbouratelnost .....	20
2.2	Komerčně vyráběné biodegradabilní elektroizolační kapaliny.....	21
2.2.1	BIOTEMP® .....	21
2.2.2	MIDEL 7131 .....	21
2.2.3	MIDEL eN 1204 .....	22
2.2.4	MIDEL eN 1215 .....	23
2.3	Experimentální elektroizolační kapaliny .....	23
2.3.1	Ester kyseliny palmitové .....	23
2.3.2	Řepkový olej a methylester řepkového oleje .....	25
2.3.3	ENVITRAFOL .....	27
2.3.4	ENVITRAFOL modifikovaný nanočásticemi .....	27
2.4	Srovnání parametrů biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin.....	29



3	Hlavní degradační mechanismy elektroizolačních kapalin.....	30
3.1	Degradační mechanismy společné pro všechny typy elektroizolačních kapalin.....	30
3.1.1	Elektrické napětí a teplota .....	30
3.1.2	Záření .....	30
3.1.3	Emulgovaná voda .....	30
3.2	Degradační mechanismy rostlinných elektroizolačních kapalin.....	31
3.2.1	Oxidace .....	31
3.2.2	Hydrogenace .....	32
3.2.3	Hydrolýza.....	32
4	Ekonomické hledisko biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin .....	34
4.1	Cena surovin .....	34
4.2	Srovnání cen komerčně vyráběných elektroizolačních kapalin .....	35
5	Využití elektroizolačních kapalin v konkrétních aplikacích .....	37
5.1	Kondenzátor .....	37
5.2	Transformátor.....	37
5.3	Kabel.....	38
5.4	Vypínač .....	39
6	Závěr.....	40
7	Seznam literatury a informačních zdrojů.....	41
	Přílohy .....	45

## 0 Úvod

Hledání a výzkum nových elektroizolačních kapalin za využití obnovitelných zdrojů, je důležitý z důvodu ochrany životního prostředí. Dosavadní průmyslová výroba je závislá na ropě, jakožto neobnovitelném zdroji. Její zásoby nejsou neomezené a v budoucnu lze předpokládat, že budou vyčerpány. Získávání ropy v některých částech světa je již v současnosti problematické a ve větší míře se využívají kontroverzní technologie. Například hydraulické frakování, které může mít velmi negativní dopad zejména na kvalitu podzemních vod. V současnosti je navíc kladen důraz na využívání ekologických výrobků napříč všemi obory.

Může se zdát, že minerální oleje využívané jako elektroizolační kapaliny představují zanedbatelné procento celosvětové těžby ropy a není nutné hledat šetrné alternativy. Je ale dobré mít na paměti, že minerální oleje jsou velice obtížně rozložitelné a v případě úniku je nutné zasažené místo dříve sanovat.

Pěstování přírodních plodin sloužících jako surovina pro elektroizolační kapaliny nicméně může být také ekologickou zátěží. Velké plantáže jednodruhových rostlin představují hrozbu pro původní faunu i flóru. Známe je i kácení deštných pralesů, které ustupují plantážím palmy olejně. Tyto nešetrné zásahy do krajiny jsou proti smyslu a filozofii, které mají biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny – šetřit životní prostředí.

# 1 Dielektrika a izolanty

Dielektrikum je látka, ve které může existovat elektrické pole a její vlastností je schopnost polarizace v elektrickém poli. Dielektrika mohou být pevná, kapalná nebo plynná. Podskupinou dielektrik jsou izolanty. Ideální izolant je látka, která neobsahuje žádné volné nosiče náboje, a tudíž nevede elektrický proud. V praxi takový izolant neexistuje a reálný izolant obsahuje určité množství volných nosičů náboje. Toto je zapříčiněno například nedostatečnou čistotou izolantu. Hlavním účelem izolantů je zabránění průchodu elektrického proudu mezi dvěma vodivými materiály. Důležitými parametry izolantů jsou elektrická pevnost  $E_p$  (V/m), konduktivita  $\gamma$  (S/m), relativní permitivita  $\epsilon_r$  a ztrátový činitel  $\tan\delta$ . [1]

## 1.1 Kapalná dielektrika

Kapalná dielektrika dobře vyplňují daný prostor, odvádějí přebytečné teplo a usnadňují zhášení výbojů. Plní tedy funkci izolačního i chladícího média. Kapalná dielektrika lze dělit dle původu na přírodní (minerální oleje, rostlinné oleje) a syntetické kapaliny. [1][2]

### 1.1.1 Minerální oleje

Minerální oleje se získávají z ropy destilací a následně se rafinují. Rafinace odstraňuje některé nežádoucí látky. Tyto oleje obsahují složitou směs uhlovodíků danou druhem a kvalitou použité ropy. Výhodou je nízká cena. Nevýhodou jsou negativní dopady na životní prostředí ať už z hlediska samotné těžby ropy nebo kvůli případným únikům samotných olejů. Důležitým parametrem minerálních olejů je viskozita a její teplotní závislost. [1][2][3]

Relativní permitivita  $\epsilon_r$  se u minerálních olejů obvykle pohybuje v rozmezí 2,1 – 2,4 a přeskokové napětí  $E_p = 60 – 70$  (kV/2,5mm). Bod vzplanutí se pohybuje kolem 130 °C. Vlivem stárnutí dochází u minerálních olejů k zhoršování elektroizolačních vlastností. V elektrotechnice se minerální oleje používají v transformátorech, spínačích, kabelech a kondenzátorech. Pro každou aplikaci jsou zapotřebí jiných vlastností olejů. Například transformátorový olej má funkci jak izolační, tak i chladící

a viskozita oleje nesmí klesnout pod určitou hodnotu. To by mělo za následek špatnou cirkulaci oleje a zhoršení chladicí schopnosti. [1][2][3]

Minerální oleje se dále dělí na parafinické minerální oleje a na naftenické minerální oleje. Jak již název napovídá, parafinické minerální oleje obsahují větší podíl parafinických uhlovodíků. Tyto oleje mají vyšší viskozitu než naftenické oleje, menší permitivitu a ztráty. Naftenické minerální oleje obsahují více naftenických molekul a mají nižší viskozitu. [1][2]

Tab. 1. Dielektrické vlastnosti vybraných kapalných izolantů [1]

Olej	Bod tuhnutí	Bod vzplanutí	Relativní permitivita	Ztrátový činitel	Elektrická pevnost
	$\vartheta_t$ (°C)	$\vartheta_v$ (°C)	$\epsilon_r$ při 20 °C	$\text{tg}\delta$ při 20 °C	$E_p$ (kV/2,5mm)
Transformátorový BTA	$\leq -45$	$>130$	2,1 – 2,4	$\leq 0,015$	$>50$
Transformátorový BTS	-40	135	2,1 – 2,4	0,015	$>50$
Kabelový VN	$\leq -8$	$>220$	-	-	-
Kondenzátorový	$\leq -40$	$>130$	2,1 – 2,25	$<0,0012$	$>50$

### 1.1.2 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje se převážně využívají v potravinářství a jejich výroba spočívá v lisování semen olejnatých rostlin. Jedná se tedy o získávání oleje z biomasy čili obnovitelného zdroje. Tyto oleje jsou dobře biologicky odbouratelné. Biologická odbouratelnost je větší než 95 % v závislosti na čistotě oleje. Skládají se z esteru glycerolu a z jedné nebo více mastných kyselin, které mohou být nasycené nebo nenasycené. V porovnání s minerálními oleji mají rostlinné oleje vyšší bod vzplanutí a rychle se rozkládají bez vzniku toxických látek. Nevýhodou je jejich vyšší cena a náchylnost k oxidaci. Podobně jako minerální oleje, tak i rostlinné oleje je nutné rafinovat. Uplatnění nacházejí i jako hydraulické oleje v zemědělské technice, kde je

velké riziko úniku a v případě použití minerálních olejů by mohlo dojít ke kontaminaci orné půdy. [3][4][5]

Dělení rostlinných olejů:

- Vysychavé:
  - Lněný olej
  - Slunečnicový olej
  - Tungový olej
  
- Nevysychavé:
  - Kokosový olej
  - Sójový olej
  - Sezamový olej
  - Řepkový olej
  - Olivový olej

### 1.1.3 Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny mají výborné chemické vlastnosti. Jsou stabilní, nestárnou a jsou nehořlavé. Dle způsobu výroby se dělí na polybutyleny, fluorované uhlovodíky, kapaliny na bázi esterů a silikonové kapaliny. [1][2]

Polybutyleny mají stabilní vlastnosti i při teplotách nad 100 °C a jsou ekologicky nezávadné. Používají se například jako náplň kabelů nebo ve svítkových kondenzátorech. Fluorované uhlovodíky mají vlastnosti lepší než minerální oleje a jsou stabilní do teploty 500 °C. Při výbojích ale uvolňují závadné fluorované plyny. Jsou také dražší než minerální oleje. Silikonové kapaliny jsou tvořeny řetězci Si-O, mají vynikající elektrické vlastnosti, jsou teplotně stálé, nehořlavé a ekologicky nezávadné. [1][2]

## 1.2 Parametry elektroizolačních kapalin

### 1.2.1 Elektrická pevnost

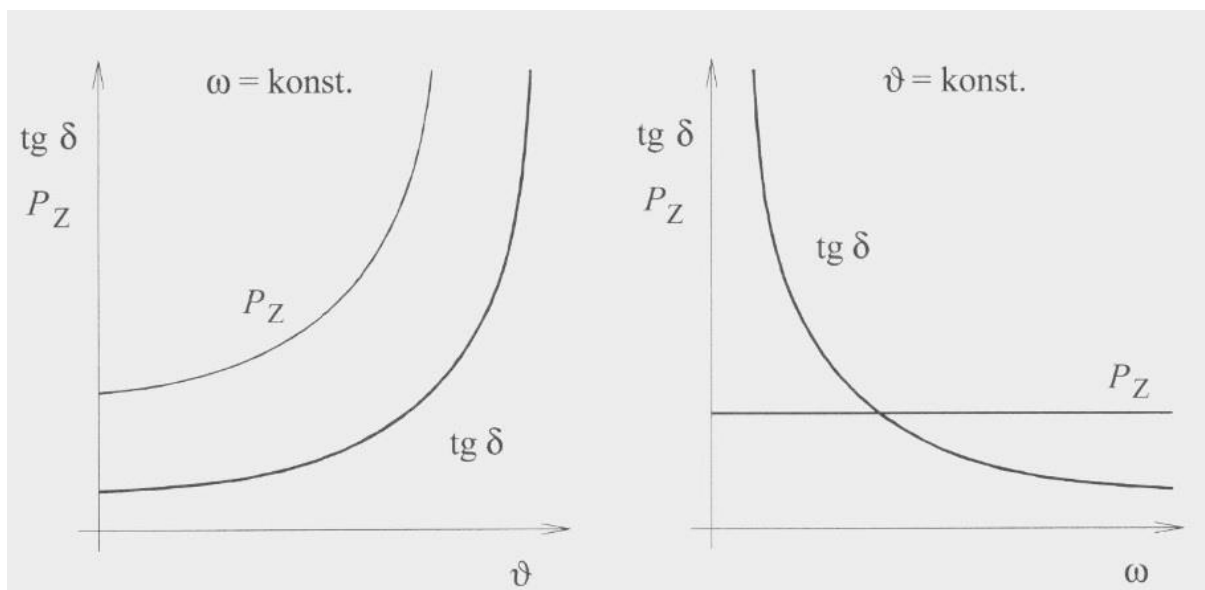
Elektrická pevnost je charakteristickou veličinou elektroizolačních materiálů. Při překročení kritické meze daného izolantu dojde k prudkému snížení rezistivity materiálu a tento proces končí výbojem. Izolační materiál pak přestává plnit svou funkci. U kapalných a plyných izolantů se tento výboj nazývá přeskokem, u pevných izolantů průrazem. Rozdíl mezi přeskokem a průrazem je, že při přeskoku dochází pouze k dočasnému snížení elektroizolačních vlastností. Elektrická pevnost je dána vztahem:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1)$$

kde  $U_p$  je hodnota přeskokového (průrazného) napětí a  $d$  je tloušťka izolantu. V praxi se hodnota přeskokového (průrazného) napětí  $E_p$  uvádí v  $kV/mm$ . [2]

### 1.2.2 Ztrátový činitel

Jelikož v každém dielektriku vznikají ztráty z důvodu nehomogenity a nečistot, je potřeba s nimi při návrhu dielektrických systémů počítat. Tyto ztráty jsou závislé na teplotě a frekvenci a způsobují ohřátí elektroizolačního materiálu. Míru těchto ztrát ukazuje ztrátový činitel  $tg\delta$ . [2]



Obr. 1. Teplotní a frekvenční charakteristika ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  a ztrátového výkonu  $P_Z$  nepolárních kapalných izolantů (převzato z [2])

### 1.2.3 Konduktivita

Konduktivita udává elektrickou vodivost daného materiálu. Značí se  $\gamma$  a její jednotkou je  $S/m$  a je převrácenou hodnotou rezistivity. U elektroizolačních materiálů je hodnota konduktivity závislá na čistotě a je menší než  $10^{-9} S/m$ . Extrémně čisté kapalně izolanty mají velmi nízkou konduktivitu (až  $10^{-15} S/m$ ). [2]

### 1.2.4 Relativní permitivita

Relativní permitivita se značí  $\epsilon_r$ , je to bezrozměrná veličina, která udává míru polárnosti dané látky. U minerálních elektroizolačních kapalin bývá tato veličina nízká (2 až 3). Nejvyšší relativní permitivitu z kapalných izolantů mají syntetické kapaliny (až 6). [1]

### 1.2.5 Viskozita

Viskozita elektroizolačních kapalin je důležitým parametrem a udává nám tekutost dané kapaliny. Její jednotkou jsou  $mm^2/s$  nebo  $cSt$ . Viskozita kapalin je závislá na teplotě. S klesající teplotou se viskozita snižuje (v extrémním případě klesne na nulu), což může mít negativní následky na elektroizolační systém. [1]

### 1.2.6 Barva

Pro stanovení jakosti a přítomnosti cizích látek kapalného izolantu je barva jedním ze základních sledovaných parametrů. Dle zabarvení lze již při odběru zjistit stav elektroizolační kapaliny. Zpravidla platí, že nové elektroizolační kapaliny mají světlou barvu a vlivem stárnutí dochází ke tmavnutí. Pokud je tedy známa výchozí barva kapaliny, je možné sledovat průběh stárnutí na základě změny barvy. Barva kapaliny se označuje číslem nebo číslem a písmenem. [6]

### 1.2.7 Obsah vody v oleji

Voda má značný vliv na zhoršení elektroizolačních vlastností kapalných izolantů, zejména na její elektrickou pevnost. Do kapalin se voda dostává převážně z ovzduší nebo je produktem oxidačního stárnutí. Voda se pak v elektroizolačních kapalinách vyskytuje v podobě volné, rozpuštěné a emulgované. [6]

### 1.2.8 Číslo kyselosti

Stárnutím oleje dochází ke zvýšení množství kyselých látek a podle jejich obsahu lze posoudit stupeň zestárnutí elektroizolačních kapalin. Číslem kyselosti se rozumí množství hydroxidu draselného, které je potřeba v nevodném alkoholickém prostředí k neutralizaci organických a anorganických kyselých složek v jednom gramu elektroizolační kapaliny. [6]

## 1.3 Elektroizolační kapaliny dle využití v zařízeních

### 1.3.1 Transformátorové oleje

Jak již bylo zmíněno, transformátorové oleje plní funkci elektroizolační i chladicí. V současné době se v České republice využívají především z historického hlediska minerální naftenické transformátorové oleje. Naftenické oleje vynikají velmi nízkým bodem tuhnutí (až  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a tak je zajištěna potřebná tekutost kapaliny například v zimních měsících. Životnost transformátoru je dána především životností papírové izolace. Uvádí se, že papírová izolace má životnost zhruba třikrát nižší, než je životnost transformátorového oleje a je závislá na stavu olejové náplně. [5][7]



Hlavní příčiny stárnutí transformátorového oleje jsou:

- Účinky energií:
  - Tepelné
  - Elektrického pole
  - Elektrických výbojů
- Účinky kyslíku
- Účinky látek alkalické a kyselé povahy
- Účinnost chlazení, vibrace

Degradací olejové náplně vznikají kaly. Tyto kaly obsahují pevné částice, které na sebe mohou vázat polární uhlovodíky a také mají schopnost na sebe vázat vlhkost. Kaly tak mohou zapříčinit například mezizávitový zkrat. Mezi další negativní účinky kalů patří usazování a následné ucpání chladících kanálů a tím zhoršení odvodu tepla. [7]

Tab. 2. Vybrané požadavky na transformátorové oleje dle IEC 60296 [5]

Hustota při 20 °C	<0,895 (g/ml)
Bod tekutosti	<-40 °C
Bod vzplanutí	Min.135 °C
Obsah vody	<40 (mg/kg)
Přeskokové napětí	30kV
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,005

### 1.3.2 Kabelové kapaliny

Základ elektroizolačního systému vysokonapěťových kabelů tvoří papír impregnovaný elektroizolačním olejem. Důležitým parametrem olejů je jejich teplotní závislost na viskozitě. Je nutné, aby při impregnaci papíru olejem byla viskozita oleje nízká a lépe zatékala do dutin kabelu. V provozních podmínkách je požadováno maximální viskozity z důvodu zabránění stékání oleje z vyšších poloh do nižších. [1]



Obr. 2. Popis vrstev jednoplášťového kabelu (převzato z [8])

V současnosti je možné se setkat se stékavými i nestékavými impregnanty. Oba tyto druhy pak využívají jiných koncovek. Koncovky pro stékavé impregnanty jsou opatřeny nádobou. [9]

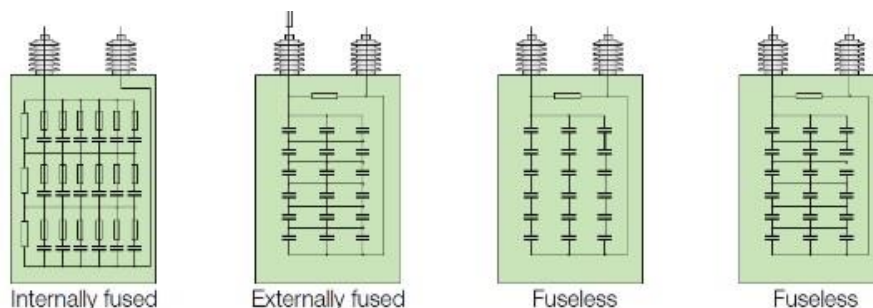
### 1.3.3 Kondenzátorové kapaliny

Požadavky dielektrických kapalin pro kondenzátory jsou především ve stabilní relativní permitivitě  $\epsilon_r$  a ztrátovém činiteli  $tg\delta$ . Dielektrický systém je tvořen papírem nebo polypropylenovou fólií, které jsou impregnovány elektroizolační kapalinou. [1][10]



Obr. 3. Vysokonapěťové kondenzátory pro HDO (převzato z [10])

Vysokonapěťový kondenzátor je složen z několika prvků zapojených paralelně a sériově za účelem dosáhnout požadované kapacity nebo napětí. Součástí kondenzátoru je vybíjecí rezistor, který má za účel minut snížit napětí na svorkách kondenzátoru na 75 V do 10-ti minut. Kvůli možnosti selhání elektroizolačního systému bývají kondenzátory také vybaveny pojistkou. [11]



Obr. 4. Vnitřní uspořádání VN kondenzátoru (převzato z [11])

#### 1.3.4 Vypínačové kapaliny

Elektroizolační kapaliny ve vypínačích mají za úkol co nejrychleji přerušit elektrický oblouk, který vznikne při oddálení kontaktů. Olej se působením tepelných účinků oblouku odpařuje a vzniklé plyny vhání do zhašecí komory další olej. Po uhašení oblouku tyto plyny a olej deionizují dráhu oblouku a nový oblouk již nemůže vzniknout. Důležitým požadavkem vypínačových elektroizolačních kapalin je nízký sklon k tvorbě sazí, které vznikají průchodem oblouku kapalinou. Tyto saze jsou vodivé a při vyšších koncentracích mohou ohrozit funkčnost vypínače. Důležitý je také nízký obsah vody, která výrazně snižuje elektroizolační pevnost systému. [1][12]



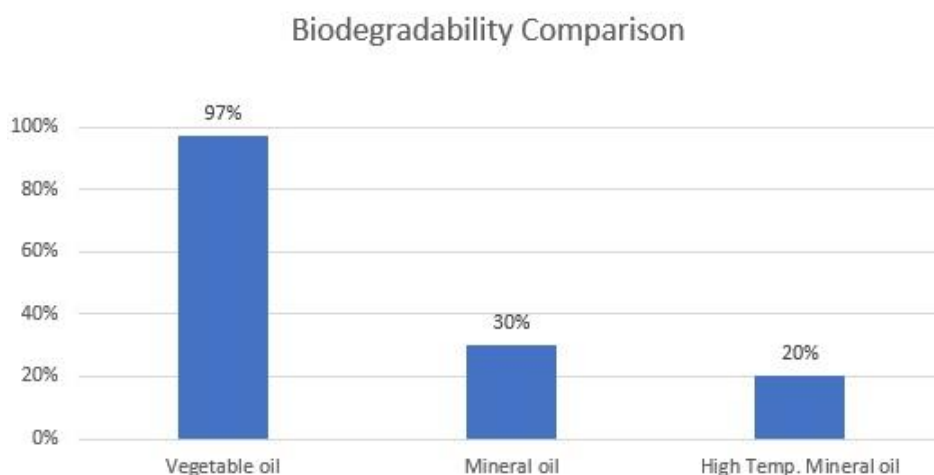
*Obr. 5. Máloolejové vypínače VVN (převzato z [12])*

## 2 Biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny

### 2.1 Biologická odbouratelnost

Biologická odbouratelnost se u kapalných izolantů uvádí jako procentuální pokles koncentrace látky v čase vlivem degradativního působení mikroorganismů. Dle technické směrnice č. 21-2009 Ministerstva životního prostředí je stanovena biologická odbouratelnost kapalin mísitelných s vodou, jako 70-ti procentní odbourání dané kapaliny během čtyř týdnů. U kapalin nemísitelných s vodou je tato odbouratelnost stanovena jako 80-ti procentní odbourání dané kapaliny během tří týdnů. [13]

Nejlepší biologickou odbouratelnost mají rostlinné oleje, neboť nenasycené estery mastných kyselin mají v molekule lineárně uspořádané uhlíky a příslušné bakterie je dokážou dobře rozložit. Finálním produktem rozkladu je uhlík a voda. Pro zlepšení vlastností a životnosti mohou být do rostlinných olejů přidána aditiva, která ale mohou mít negativní dopad na biologickou odbouratelnost. [14]



Obr. 6. Srovnání biologické odbouratelnosti elektroizolačních kapalin (převzato z [15])

## 2.2 Komerčně vyráběné biodegradabilní elektroizolační kapaliny

### 2.2.1 BIOTEMP®

BIOTEMP® je vysokoteplotní biologicky odbouratelný elektroizolační olej vyrobený ze slunečnicového oleje. Tento olej je odbouratelný ze 97 % během 21 dní. Mezi jeho přednosti patří vysoká teplotní stabilita a bod vzplanutí nad 300 °C. Při hoření neprodukuje jedovaté zplodiny. Bod tuhnutí se pohybuje mezi -15 °C až -25 °C, avšak při této teplotě má olej gelovitou konzistenci a stále poskytuje elektroizolační i chladící vlastnosti. Při testu v transformátoru byla tato jednotka naplněná olejem BIOTEMP® zchlazena na teplotu -70 °C a vystavena jmenovitému zatížení. Při tomto testu bylo zjištěno, že se kapalina vrátila z gelovité do kapalné konzistence bez jakýchkoliv nežádoucích účinků. Olej obsahuje inhibitory, které brání oxidaci. [15][16]

Tab. 3. Vybrané parametry elektroizolačního oleje BIOTEMP® [16]

Elektrická pevnost $E_p$ při 25 °C	45 (kV/2,5mm)
Viskozita při 0 °C	300 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	10 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod vzplanutí	330 °C
Relativní permitivita $\epsilon_r$ při 25 °C	3,2
Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ při 25 °C	0,0015
Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ při 100 °C	0,002

### 2.2.2 MIDEL 7131

MIDEL 7131 je syntetická esterová dielektrická kapalina. Mezi její přednosti patří snadná biologická odbouratelnost, vysoký bod vzplanutí a velmi nízký bod tuhnutí, díky kterému lze tuto kapalinu použít i v extrémně chladných oblastech. Další zajímavou vlastností je vysoká absorpce vlhkosti, aniž by došlo ke snížení přeskokového napětí (až 600ppm) a vysoký limit nasycení vlhkosti, při kterém dojde k vysrážení vody (2700ppm při 20 °C). [17]

Tab. 4. Vybrané parametry elektroizolačního oleje MIDEL 7131 [17][18]

Elektrická pevnost $E_p$ při 25 °C	>75 (kV/2,5mm)
Viskozita při 0 °C	233 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	5,3 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod tuhnutí	-56 °C
Bod vzplanutí	260 °C
Relativní permitivita $\epsilon_r$	3,2
Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ při 90 °C	<0,008

### 2.2.3 MIDEL eN 1204

Midel eN 1204 je netoxická, biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina vyrobená z řepkového oleje. Mezi její přednosti patří taktéž vysoký bod vzplanutí a nízký bod tuhnutí. Absorpce vlhkosti, aniž by došlo ke snížení přeskokového napětí (300ppm) a limit nasycení vlhkosti (1100ppm při 20 °C) je nižší než u předešlé kapaliny. [19]

Tab. 5. Vybrané parametry elektroizolačního oleje MIDEL eN 1204 [18][19]

Elektrická pevnost $E_p$ při 25 °C	>75 (kV/2,5mm)
Viskozita při 0 °C	232 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	8,3 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod tuhnutí	-31 °C
Bod vzplanutí	>260 °C
Relativní permitivita $\epsilon_r$	3,1
Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ při 90 °C	<0,03

## 2.2.4 MIDEL eN 1215

MIDEL eN 1215 je netoxická, biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina vyrobená ze sójového oleje. Vzhledem k jejímu relativně vysokému bodu tuhnutí je vhodná spíše do oblastí s teplejším klimatem nebo pro využití ve vnitřních prostorech. Absorpce vlhkosti, aniž by došlo ke snížení přeskokového napětí a limit nasycení je u této kapaliny stejný jako u předchozí kapaliny (300ppm a 1100ppm při 20 °C). [20]

Tab. 6. Vybrané parametry elektroizolačního oleje MIDEL eN 1215 [18][20]

Elektrická pevnost $E_p$ při 25 °C	>75 (kV/2,5mm)
Viskozita při 0 °C	206 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	7,6 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod tuhnutí	-18 °C
Bod vzplanutí	>260 °C
Relativní permitivita $\epsilon_r$	3,1
Ztrátový činitel $\tan\delta$ při 90 °C	<0,03

## 2.3 Experimentální elektroizolační kapaliny

### 2.3.1 Ester kyseliny palmitové

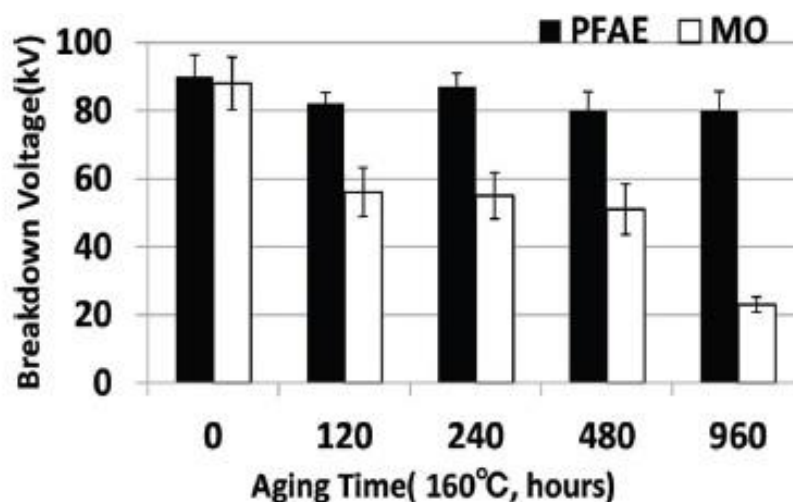
Ester kyseliny palmitové je netoxický monoester, vyrobený destilací palmového oleje. Tento ester vykazuje výbornou oxidační stabilitu a je biologicky odbouratelný ze 77 % za 28 dní. Dále vykazuje vyšší chladicí účinnost, vyšší elektrickou pevnost, vyšší ochranu papírové izolace a nižší viskozitu narozdíl od konvenčních minerálních olejů. Zajímavá je schopnost absorpce vlhkosti, kdy při koncentraci vlhkosti 300ppm si ester palmitové kyseliny zachovává přeskokové napětí kolem 80 kV. Tento ester je slibným kandidátem pro využití v transformátorech jako náhrada za minerální oleje. [21]



Tab. 7. Srovnání parametrů esteru palmitové kyseliny s konvenčním minerálním olejem [21]

	Minerální olej	Ester palmitové kyseliny
Elektrická pevnost $E_p$	78 (kV/2,5mm)	94 (kV/2,5mm)
Viskozita při 40 °C	8,25 (mm <sup>2</sup> /s)	5,06 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	2,23 (mm <sup>2</sup> /s)	1,79 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod tuhnutí	-32,5 °C	-37,5 °C
Bod vzplanutí	144 °C	178 °C
Relativní permitivita $\epsilon_r$	2,2	2,94
Ztrátový činitel $tg\delta$	0,005	0,007

Při testu zrychleného stárnutí (viz. obr. 7.) bylo zjištěno, že papírová izolace impregnovaná esterem palmitové kyseliny vykazuje až 6,1krát delší životnost než při impregnaci konvenčním minerálním olejem. Na konci testu trvajícím 960 hodin bylo zároveň zjištěno, že se hodnota přeskovového napětí esteru palmitové kyseliny pohybovala kolem 80 kV. Naproti tomu hodnota přeskovového napětí konvenčního minerálního oleje klesla až ke 20 kV. [21]



Obr. 7. Test zrychleného stárnutí – závislost přeskovového napětí na čase (PFAE – ester kyseliny palmitové, MO – minerální olej) (převzato z [21])

### 2.3.2 Řepkový olej a methylester řepkového oleje

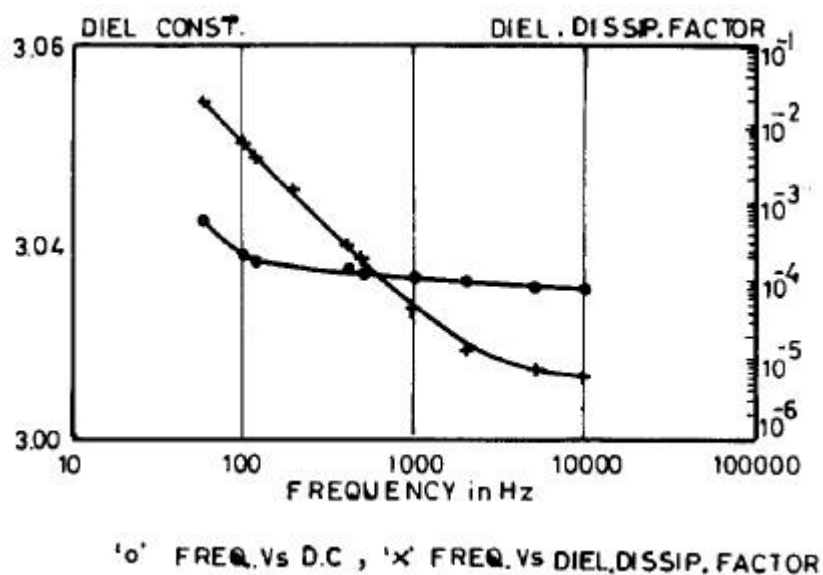
Řepkový olej se vyrábí lisováním semen řepky olejné, přičemž výtěžek oleje se pohybuje kolem 40 % hmotnosti. Řepkový olej má vysokou viskozitu a bod vzplanutí. Největší využití nachází v oblasti paliv. Reesterifikací řepkového oleje se vyrábí methylester řepkového oleje, který se přidává do nafty jako biosložka. Reesterifikace je chemický proces, při kterém řepkový olej za přítomnosti alkalických hydroxidů reaguje s methanolem. Výslednými produkty reakce jsou methylester řepkového oleje a glycerin. [22]

Pro využití v elektroizolačních systémech musí řepkový olej projít rafinací. Rafinací se olej zbaví složek, které by mohli mít negativní vliv na jeho vlastnosti. Surový řepkový olej obsahuje směs nenasycených a nasycených mastných kyselin ve které převažuje mastná kyselina olejová se zastoupením až 60 %. [23]

Tab. 8. Vybrané parametry řepkového oleje [23]

Elektrická pevnost $E_p$	51,19 (kV/2,5mm)
Viskozita při 40 °C	35,7 (mm <sup>2</sup> /s)
Relativní permitivita $\epsilon_r$ při 50 Hz	3,23
Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ při 50 Hz	0,038
Rezistivita při 90 °C	$9,45 \cdot 10^7$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

Dle studie indických vědců by mohl methylester řepkového oleje (MEŘO) najít uplatnění v kondenzátorech. MEŘO při testování vykazoval nízkou hodnotu ztrátového činitele při vyšších frekvencích a zároveň stabilitu relativní permitivity v širokém spektru frekvence (viz. obr. 8). [24]



Obr. 8. Závislost relativní permitivity (DIEL. CONST.) a ztrátového činitele (DIEL. DISSIP. FACTOR) na frekvenci (převzato z [24])

MEŘO dále vykazuje vysokou elektrickou pevnost a vysoký bod vznícení, který je vlastně doménou všech rostlinných olejů. MEŘO dále má relativně nízký bod tuhnutí a vysokou viskozitu. [24]

Tab. 9. Vybrané parametry MEŘO [24]

Elektrická pevnost $E_p$	60 (kV/2,5mm)
Viskozita při 25 °C	8 (mm <sup>2</sup> /s)
Relativní permitivita $\epsilon_r$	3,0
Bod tuhnutí	-10 °C
Rezistivita při 27 °C	$19 \cdot 10^{12}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
Číslo kyselosti	0,0001 (mg/g)

### 2.3.3 ENVITRAFOL

ENVITRAFOL je perspektivní, biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina vyvinutá vědci z Katedry technologií a měření FEL ZČU v Plzni. Jedná se o upravený řepkový olej, který je určen pro použití jako elektroizolační kapalina v transformátorech. [25]

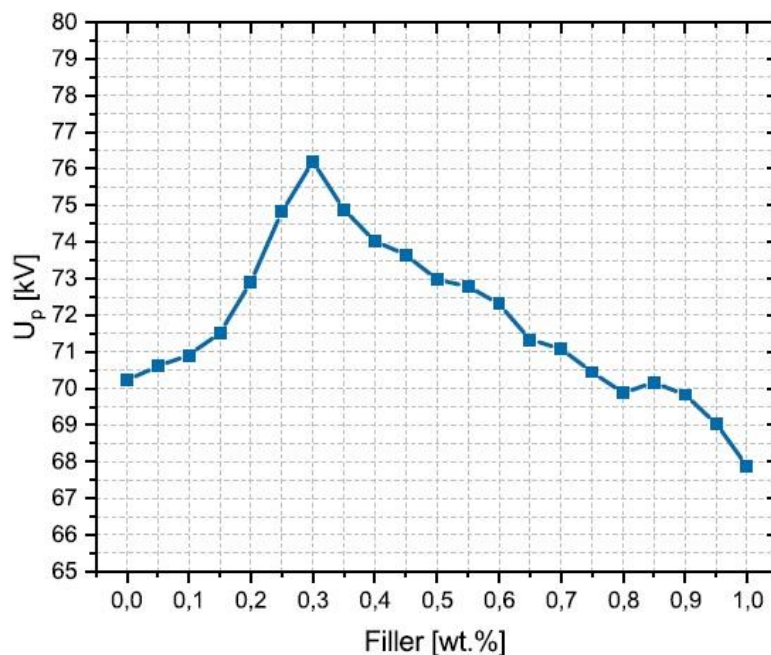
Princip výroby spočívá ve zbavení vlhkosti potravinářského řepkového oleje vhodným sorbentem a zbavení kyselých polárních látek pomocí perkolace. Jedná se o nucené proudění řepkového oleje ohřátého na 60 °C kolonou naplněnou sorbentem – bazickou termicky aktivovanou Aluminou v kombinaci s Fullerovou hlinkou a následné filtrování přes buničínový filtr. Dále je pro zlepšení oxidační stability je použit inhibitor fenolického typu v koncentraci 0,5 % hmotnosti. [25]

Tab. 10. Vybrané parametry oleje ENVITRAFOL [25]

Elektrická pevnost $E_p$	60,3 (kV/2,5mm)
Viskozita při 40 °C	35,84 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	8,6 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod tuhnutí	-24 °C
Ztrátový činitel $\tan\delta$ při 90 °C	0,00358
Obsah vody	45,8 (mg/kg)

### 2.3.4 ENVITRAFOL modifikovaný nanočásticemi

Pro zlepšení vlastností oleje ENVITRAFOL byl při experimentu tento elektroizolační olej aditivován sférickými nanočásticemi oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o rozměrech kolem 40 nm s čistotou 99,5 %. Tyto nanočástice mají vliv na hodnotu elektrické pevnosti (viz. obr. 9). Při zvyšování koncentrace nanočástic dochází ke zvyšování hodnoty elektrické pevnosti až do koncentrace 0,3 % hmotnosti. Po překročení této koncentrace hodnota elektrické pevnosti strmě lineárně klesá. [26]

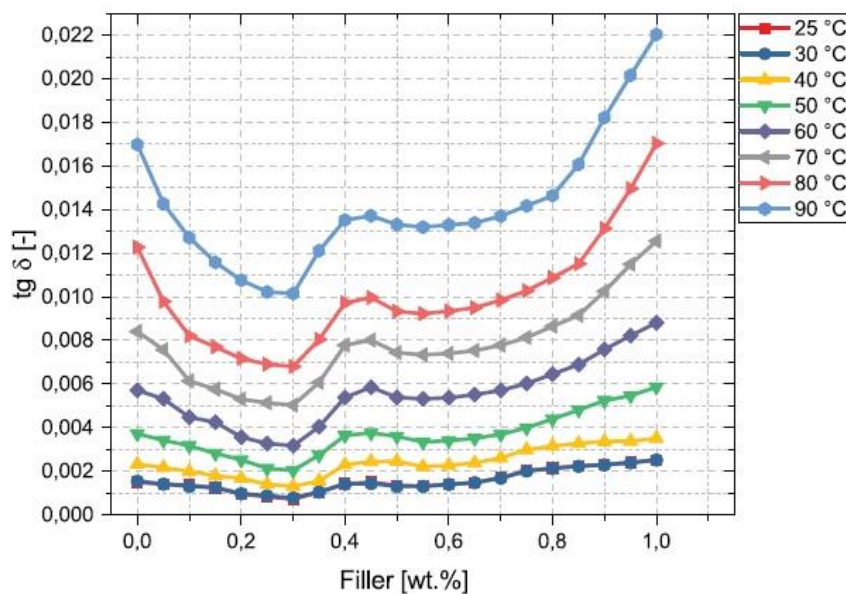


Obr. 9. Závislost přeskokového napětí ( $U_p$ ) na koncentraci nanočástic (Filler) (převzato z [26])

Pro praktické využití je důležitá stabilní hodnota ztrátového činitele  $tg\delta$ . Při změně koncentrace nanočástic dochází ke změně stability ztrátového činitele v závislosti na teplotě. Tento rozptyl nabývá nejmenší hodnoty při koncentraci nanočástic 0,3 % hmotnosti. Tato závislost je znázorněná na obr. 10. [26]

Nanočástice mají také vliv na zlepšení rezistivity. Přidáním nanočástic opět v koncentraci 0,3 % hmotnosti, se rezistivita při 90 °C zvýšila až o 139,08 % oproti nemodifikovanému oleji ENVITRAFOL. [26]

Modifikace nanočásticemi se ukazuje jako správný krok ve hledání nových perspektivních elektroizolačních kapalin, protože mají pozitivní dopad na elektroizolační vlastnosti olejů. Nicméně je nutné provést studie na dopad nanočástic na životní prostředí. [26]



Obr. 10. Závislost ztrátového činitele ( $\text{tg } \delta$ ) na koncentraci nanočástic (Filler)  
(převzato z [26])

## 2.4 Srovnání parametrů biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin

Porovnáním parametrů biologicky odbouratelných kapalin bylo zjištěno, že u komerčně vyráběných kapalin, dosahují nejvyšší hodnoty elektrické pevnosti kapaliny společnosti Midel. Kapalina Midel eN 7131 má nejnižší bod tuhnutí. Tato skutečnost je ale zapříčiněna faktem, že je jako jediná z porovnávaných kapalin syntetického původu. Kapalina Biotemp od společnosti ABB vyniká nejvyšším bodem vzplanutí a nejnižší hodnotou ztrátového činitele, avšak má nejvyšší obsah vody. Srovnání dalších parametrů komerčně vyráběných elektroizolačních kapalin je uvedeno v příloze A. Oba výrobci se zmiňují, že jejich kapaliny jsou aditivovány inhibitory, nicméně z dostupných materiálů nebylo možné zjistit jejich obsah. [16][17][18][19][20]

Nejvyšší hodnotu elektrické pevnosti u experimentálních biologicky odbouratelných kapalin má ester kyseliny palmitové. Tato kapalina má dále nejnižší viskozitu i nejnižší bod tuhnutí, avšak také nejnižší bod vzplanutí. Dobrých výsledků v elektrické pevnosti dosahuje i olej ENVITRAFOL, resp. jeho modifikovaná varianta. Další parametry jsou uvedeny v příloze B. [21][22][23][24][25][26]

### **3 Hlavní degradační mechanismy elektroizolačních kapalin**

#### **3.1 Degradační mechanismy společné pro všechny typy elektroizolačních kapalin**

##### **3.1.1 Elektrické napětí a teplota**

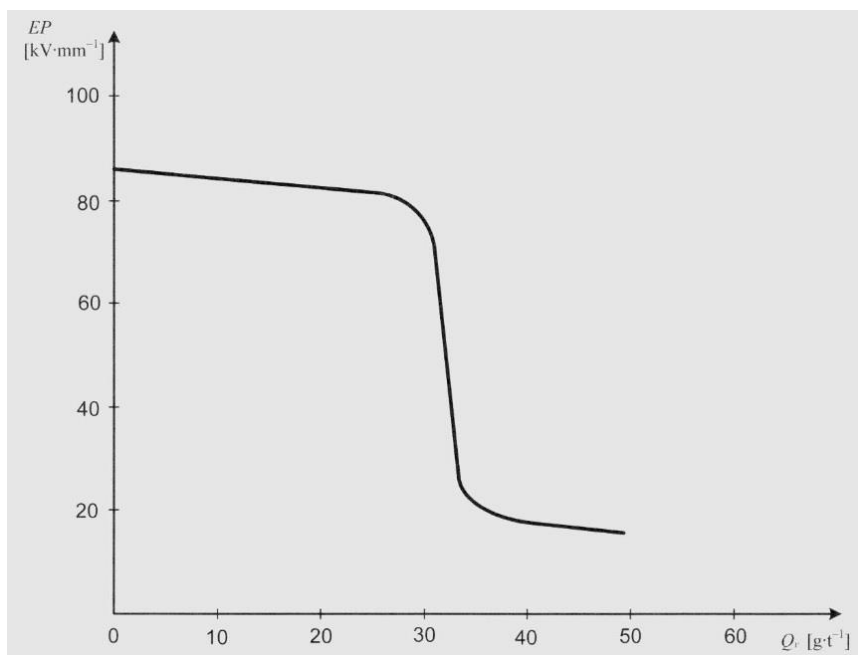
Elektrické napětí patří mezi nejdůležitější degradační činitele elektroizolačního systému. Vlivem elektrického průrazu v impregnovaném materiálu nebo přeskoku v elektroizolační kapalině dochází k tvorbě vodivých částic, které znehodnocují elektroizolační kapalinu. Vlivem delšího působení elektrického napětí může docházet k tepelnému průrazu. Důvodem je lokální přehřátí elektroizolační kapaliny kvůli dielektrickým a Jouleovým ztrátám, které vede ke zvýšení vodivosti kapaliny. [2]

##### **3.1.2 Záření**

Degradace elektroizolačních kapalin vlivem záření – fotodegradace, je dalším společným degradačním mechanismem všech kapalných izolantů. Vlivem záření dochází k absorpci části záření. Každý typ elektroizolačních kapalin absorbuje různé vlnové délky, to je zapříčiněno rozdílným chemickým složením dané kapaliny. Následkem fotodegradace je rozštěpení vazeb C-H nebo C=C za vzniku například methanu nebo volného vodíku. [27]

##### **3.1.3 Emulgovaná voda**

Jak již bylo zmíněno, voda negativně ovlivňuje elektroizolační systém. Emulgovaná voda má podobu mikroskopických kapek vody a oleje může tvořit hydrofilní nebo hydrofobní emulzi. Vzniká přesycením elektroizolační kapaliny a má za následek prudké snížení elektrické pevnosti a zároveň zvýšení dielektrických ztrát. Částičky emulgované vody jsou přitahovány do míst s vysokou intenzitou elektrického pole a vytváří se vodivá cesta, která může vést k přeskoku. Dalším negativem je možnost obsahu rozpuštěných látek, které jsou rozpustitelné ve vodě. [6][27]

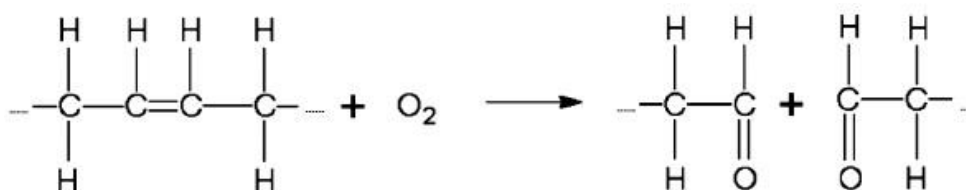


Obr. 11. Závislost elektrické pevnosti  $E_p$  na obsahu vody v Oleji  $Q_v$  (převzato z [6])

## 3.2 Degradační mechanismy rostlinných elektroizolačních kapalin

### 3.2.1 Oxidace

Oxidace je hlavním degradačním procesem rostlinných elektroizolačních olejů. Čím je vyšší podíl nenasycených mastných kyselin v elektroizolačním oleji, tím klesá oxidační stabilita. Tato skutečnost je způsobena obsahem dvojných vazeb uhlíku C=C. Tyto vazby jsou napadány volnými radikály, které se naváží na uhlík a tím dojde k rozrušení struktury mastné kyseliny. Oxidací vznikají další volné radikály, kyseliny a další nežádoucí produkty obsahující kyslík. S množstvím oxidačních produktů stoupá rychlost oxidace exponenciálně, přičemž má na její rychlost vliv také teplota a záření. [28]

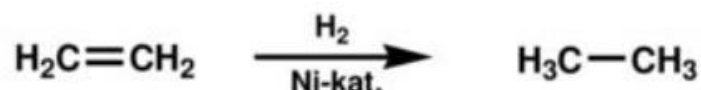


Obr.12. Oxidace mastných kyselin (převzato z [28])



### 3.2.2 Hydrogenace

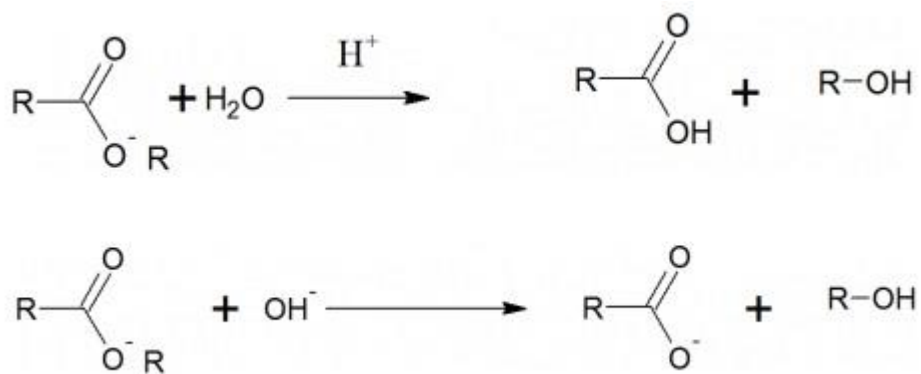
Chemickou reakcí plynného vodíku, který může být produktem jiného degeneračního mechanismu, dochází ke změně nenasycených mastných kyselin na transmastné nebo nasycené mastné kyseliny. Tato chemická reakce, jejíž podstatou je příjem vodíku uhlíkem a zánik dvojně vazby se nazývá hydrogenace. Důsledkem hydrogenace u nenasycených mastných kyselin je snížení počtu dvojných vazeb ve struktuře mastné kyseliny. Hydrogenace je hojně využívána například v potravinovém průmyslu, kde se využívá pro ztužování tuků. Například pro výrobu margarínu. U kapalných elektroizolačních kapalin jde ale o silně nežádoucí jev, při kterém dochází v olejích ke zvyšování viskozity. [29][30]



Obr.13. Princip hydrogenace s Ni katalyzátorem (převzato z [31])

### 3.2.3 Hydrolýza

Hydrolýza je chemickou reakcí alkalických nebo kyselých látek a přírodních esterů za přítomnosti vody. Podle druhu reagující látky se hydrolýza dělí na zásaditou a kyselou, přičemž se liší i vznikajícími produkty. Produkty zásadité hydrolýzy jsou soli karboxylových kyselin a alkoholy. Při kyselé hydrolýze vznikají také alkoholy a karboxylové kyseliny. Zásaditá hydrolýza se využívá například při výrobě mýdel. [29][32]



Obr.14. Kyselá hydrolýza (nahore) a alkalická hydrolýza (dole)

(převzato z [32])

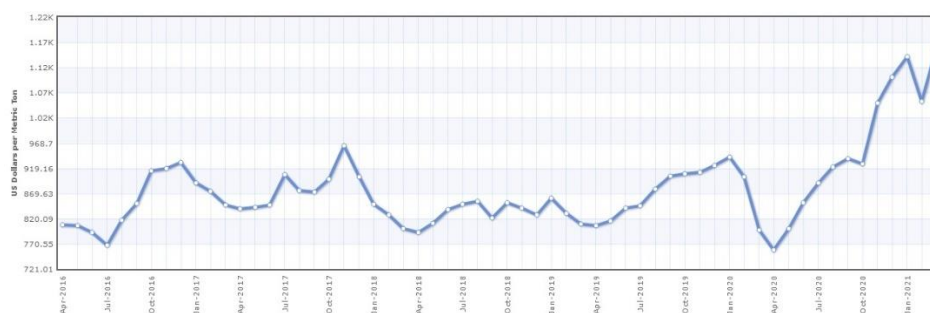
## 4 Ekonomické hledisko biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin

### 4.1 Cena surovin

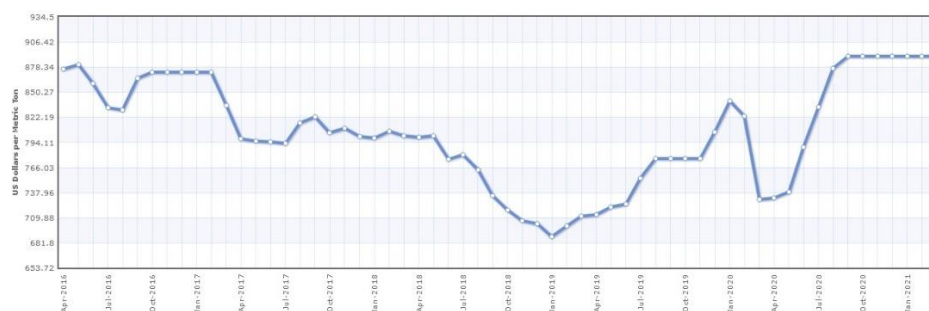
Ekonomické hledisko je taktéž důležitým parametrem při volbě vhodné elektroizolační kapaliny. V současné době se ceny rostlinných olejů, coby suroviny pro výrobu nových elektroizolačních kapalin pohybují nejvýše za posledních 5 let. Podle Agrární komory České republiky bude trend zdražování pokračovat. Důvodem růstu ceny řepkového oleje je jeho zvyšující se poptávka na evropských trzích, zejména z důvodu jeho využívání v biopalivech. Důvodem zdražení palmového oleje je propad v úrodě kvůli záplavám a nedostatek pracovní síly v Malajsii. [33][34]

Burzovní ceny rostlinných olejů, březen 2021:

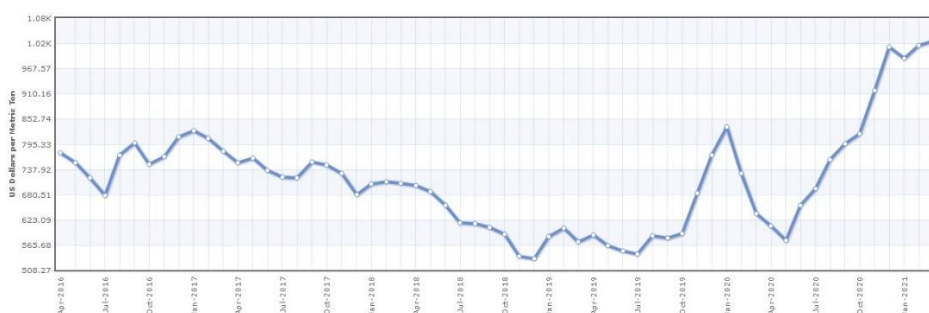
- Řepkový olej – 1160 USD/t
- Slunečnicový olej – 890 USD/t
- Palmový olej – 1030 USD/t



Obr. 15. Vývoj ceny řepkového oleje (převzato z [33])



Obr. 16. Vývoj ceny slunečnicového oleje (převzato z [33])



Obr. 17. Vývoj ceny palmového oleje (převzato z [33])

## 4.2 Srovnání cen komerčně vyráběných elektroizolačních kapalin

Srovnání cen komerčně vyráběných elektroizolačních kapalin je znázorněno v tabulce tab. 11. Pro porovnání cen biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin s minerálními elektroizolačními kapalinami byl vybrán minerální olej Mogul Trafo CZ-A. Jedná se o inhibovaný elektroizolační olej primárně určen pro transformátory. Lze ho však použít i do spínačů, kondenzátorů a jiných elektrických zařízení. [35]

Prodej olejů Midel en 1204 a Midel en 7131 zajišťuje britská společnost Edenoil, která je partnerem společnosti Midel. Ceny jsou proto uváděny v librách za 25l balení. Pro lepší názornost je v tabulce tab. 11. uvedena i cena přepočítaná na české koruny dle kurzu České Národní Banky ze dne 5.5.2021, který činil 29,909 Kč za 1£. [36][32]

Tab. 11. Srovnání cen komerčních elektroizolačních kapalin [35][36]

Olej	Cena za 25 l v £	Cena za 1 l v Kč	Rozdíl v %
Mogul Trafo CZ-A	-	120	-
Midel eN 1204	360	430,69	+258,91
Midel eN 7131	334,80	400,54	+233,78
Midel eN 1205	Nezjištěno*	-	-
BIOTEMP®	Nezjištěno*	-	-

*\*pozn. oleje Midel eN 1205 a BIOTEMP® jsou pravděpodobně nedostupné a jejich cenu se nepodařilo zjistit*

## 5 Využití elektroizolačních kapalin v konkrétních aplikacích

### 5.1 Kondenzátor

Pro využití v kondenzátoru byl vybrán jako vhodný kandidát na biologicky odbouratelnou elektroizolační kapalinu methylester řepkového oleje (MEŘO). Důvodem je přijatelná hodnota elektrické pevnosti, nízká viskozita, která činí impregnaci jednodušší a nízké číslo kyselosti, které ovlivňuje stabilitu materiálů. Dále má MEŘO vysokou rezistivitu a stabilní relativní permitivitu  $\epsilon_r$ , která by pro využití v kondenzátoru neměla být moc vysoká ani nízká ve srovnání s použitým pevným dielektrikem – papírem a polypropylenovou fólií. Papír má relativní permitivitu 4,5 a polypropylenová fólie 2,5. Relativní permitivita MEŘO je tedy v rozmezí 3-4, které je vhodné pro použití v kondenzátoru. Výzkum indických vědců rovněž poukázal, že tato elektroizolační kapalina je vhodná pro využití i v kondenzátorech pro vyšší frekvence. Z výsledků jejich práce je patrné, že není nutné se omezit pouze na síťové kmitočty. Se vzrůstající frekvencí sice hodnota relativní permitivity klesá, avšak tato hodnota zůstává stále ve vhodném rozmezí. Pozitivním faktem je, že se vzrůstající frekvencí klesá hodnota ztrátového činitele. Tato elektroizolační kapalina je tedy vhodná i pro kondenzátory pro frekvence do 10 kHz. [24]

### 5.2 Transformátor

Nebudeme-li uvažovat celou řadu dnes již komerčně vyráběných biologicky odbouratelných transformátorových olejů a zaměříme se na nové a perspektivní kapaliny, tak pro využití v transformátoru byl vybrán elektroizolační olej ENVITRAFOL. Důvodem pro výběr je velmi nízký ztrátový činitel  $tg\delta$ , nízký obsah vody, vysoká elektrická pevnost a v neposlední řadě také fakt, že se jedná o domácí produkt vyráběný z řepkového oleje, který je dobře dostupný. Olej ENVITRAFOL modifikovanými nanočásticemi sice dosahuje lepších výsledků, zejména má větší elektrickou pevnost a rezistivitu narozdíl od nemodifikovaného oleje ENVITRAFOL, nicméně tento elektroizolační olej v současnosti není možné doporučit kvůli chybějícím studiím dopadů nanočástic na životní prostředí. [25][26]

V případě využití komerčně vyráběných elektroizolačních kapalin by bylo vhodné využít kapalinu společnosti Midel, Midel eN 7131. Tato kapalina vyniká mezi zkoumanými komerčními kapalinami nejnižším bodem tuhnutí, ikdyž v porovnání s olejem ENVITRAFOL má vyšší hodnotu ztrátového činitele  $tg\delta$ . Podobně jako všechny uvedené komerčně vyráběné elektroizolační kapaliny, byl i Midel eN 7131 vyvinut primárně pro využití v transformátorech. [17][25]

### 5.3 Kabel

Podobně jako u elektroizolačních kapalin pro kondenzátor je i u kabelových kapalin kladen důraz na nízkou viskozitu elektroizolační kapaliny během impregnování. V provozních podmínkách je však u kabelových kapalin vyžadována co nejvyšší viskozita. Jak již bylo zmíněno, je důležitá teplotní závislost viskozity kapaliny. Nutnost teplotní závislosti viskozity kapaliny lze v současné době eliminovat použitím kabelových koncovek pro stékavé impregnanty. Při využití těchto kabelových koncovek by bylo vhodné využít jako elektroizolační kapalinu ester kyseliny palmitové. [9][21]

Využití esteru kyseliny palmitové v kabelech opatřenými nestékavými koncovkami není vhodné právě kvůli nízké viskozitě této kapaliny. Může docházet ke stékání elektroizolační kapaliny do nižších míst a výše položená místa v kabelu by byla vystavena nebezpečí snížení elektrické pevnosti. Celkově by tak byl ohrožen celý elektroizolační systém kabelu. Dalším důvodem pro využití v kabelech opatřených stékavými koncovkami je nejvyšší hodnota elektrické pevnosti ze všech zkoumaných biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin. Tento parametr je důležitý a ovlivňuje prostorovou náročnost izolace, a tedy celkový průměr a cenu kabelu (při vyšší hodnotě elektrické pevnosti je možné použít tenčí izolaci). Papírová izolace má navíc po impregnaci esterem kyseliny palmitové delší životnost ve srovnání s minerálním olejem. Při testu zrychleného stárnutí trvajícím 960 hodin bylo zjištěno, že u esteru kyseliny palmitové klesla hodnota elektrické pevnosti ze 94 kV/2,5mm na zhruba 80 kV/2,5mm, což je asi 6krát lepší výsledek, než kterého v testu dosáhla konvenční minerální elektroizolační kapalina. [9][21]

## 5.4 Vypínač

Vypínač, jakožto venkovní zařízení, je vystaven klimatickým jevům mezi které patří například i velmi nízké teploty v zimních měsících a využití elektroizolačních kapalin rostlinného původu v této konkrétní aplikaci je problematické zejména kvůli jejich vysokému bodu tuhnutí. Zdánlivě vhodným kandidátem z rostlinných kapalin se jeví ester kyseliny palmitové. Ester kyseliny palmitové představuje výjimku, co se týče bodu tuhnutí – má ho nejnižší ze všech zkoumaných experimentálních biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin. Další předností je velmi nízká viskozita a velká elektrická pevnost. Nevýhodou je poměrně vysoká absorpce vody a také nejnižší hodnota bodu vznícení mezi všemi zkoumanými elektroizolačními kapalinami. Dle studie japonských vědců si sice tato elektroizolační kapalina zachovává vysokou hodnotu elektrické pevnosti i při vysoké koncentraci absorbované vody, avšak nebyly provedené studie na využití této kapaliny ve vypínačové technice. Pokud by se tedy mělo uvažovat o esteru kyseliny palmitové jako o nové, biologicky odbouratelné elektroizolační kapalině, bude nutné prozkoumat zejména dopady průchodu elektrického oblouku na stav kapaliny. [12][21]



## 6 Závěr

Pro porovnání vlastností elektroizolačních kapalin byly vybrány čtyři zástupci z komerčně vyráběných biologicky odbouratelných kapalin a čtyři zástupci experimentálních elektroizolačních kapalin. V práci jsou také uvedeny parametry surového řepkového oleje, které slouží pouze pro porovnání. Surový řepkový olej nelze využít jako elektroizolační kapalinu z důvodu nízké odolnosti proti oxidaci a malé rezistivity. Dále byl proveden popis degradačních mechanismů. Ukazuje se, že elektroizolační kapaliny vyrobené z rostlinných olejů jsou náchylné na oxidaci, proto je nutné chránit před oxidací například inhibitory. Z degradačních mechanismů byl kromě oxidace popsán i mechanismus hydrogenace a hydrolýzy.

Z ekonomického hlediska vyplývá, že biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny jsou dražší než minerální oleje. Při porovnání kapalin Midel rostlinného původu a minerálního oleje Mogul Trafo CZ-A vyplývá, že kapaliny Midel jsou více než 2krát dražší. Podle Agrární komory České republiky lze očekávat zdražování surových rostlinných olejů a rozdíly cen tedy mohou být ještě vyšší.

Pro využití v kondenzátoru byla vybrána elektroizolační kapalina methylester řepkového oleje (MEŘO). Pro využití v transformátoru byla primárně vybrána kapalina ENVITRAFOL. Z komerčně vyráběných biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin byla dále vybrána pro využití v transformátoru kapalina Midel eN 7131. Jelikož ale všechny komerčně vyráběné elektroizolační kapaliny uvedené v práci jsou vyvinuty pro transformátory, lze je také použít. Jako kabelová kapalina byl vybrán ester kyseliny palmitové s omezením pouze pro kabely opatřené koncovkami pro stékavé impregnanty. Pro využití ve vypínačích byl vybrán opět ester kyseliny palmitové, avšak jeho vhodnost nebyla plně prokázána.

Z dostupných zdrojů vyplývá, že bylo provedeno mnoho studií na využití biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin v transformátorech ale velmi málo studií na využití v dalších aplikacích. Bylo by tedy vhodné provést výzkumy ohledně využití těchto kapalin v dalších aplikacích.

## 7 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] LIPTÁK, Jan a SEDLÁČEK, Josef. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2008. ISBN 978-80-01-03191-9
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6
- [3] TRNKA, Pavel, MENTLÍK, Václav a ČERNÝ, Jaroslav. *Electroinsulating Fluids – New Insulating Mixtures*. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4577-0986-9. [online]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6232722>
- [3] TRNKA, Pavel, MENTLÍK, Václav a ČERNÝ, Jaroslav. *Electroinsulating Fluids – New Insulating Mixtures*. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4577-0986-9. [online]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6232722>
- [4] BOSS, P., OOMMEN, T. V., *NEW INSULATING FLUIDS FOR TRANSFORMERS BASED ON BIODEGRADABLE HIGH OLEIC VEGETABLE OIL AND ESTER FLUID*. IEEE, 1999. [online]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=790746>
- [5] BUREŠ, Pavel. *Elektroizolační oleje*. MM průmyslové spektrum, 2015. [online]. Dostupné z:  
<https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroizolacni-oleje.html>
- [6] MENTLÍK V., PIHERA J., POLANSKÝ R., PROSR P. a TRNKA P., *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9
- [7] BARBORKA, Vít. *Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů*. ČD s. o., Technická ústředna dopravní cesty, sekce elektrotechniky a energetiky, Středisko zkušebnictví, Plzeň, 2002. [online]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/diagnostika-transformatorovych-oleju-v-navaznosti-na-prodlouzeni-zivotnosti-transformatoru--14835>

- [8] Firemní materiály společnosti ELTECH CZ, *Katalog VN 2015*, [online]. Dostupné z: <https://www.eltechcz.cz/download.php?idx=650&di=3>
- [9] Firemní materiály společnosti TE Connectivity, *Silové kabelové soubory*, [online]. Dostupné z: <https://www.te.com/content/dam/te.com/documents/energy/global/productdocuments/Miscellaneous%20Locations/energy-epp0500-SiloveKabeloveSoubory-czech.pdf>
- [10] Firemní materiály společnosti ZEZ SILKO, s.r.o., *Kondenzátory VN pro HDO vysílače*, [online]. Dostupné z: <https://www.zez-silko.cz/customzone/files/ripple.pdf>
- [11] Firemní materiály společnosti ABB, *Power capacitors and harmonic filters*, [online]. Dostupné z: <http://new.abb.com/high-voltage/capacitors/hv>
- [12] STRÁNSKÝ David. *Diagnostika výkonových vypínačů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2013. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Konstantin Schejbal, CSc.
- [13] SPOHNER, M. *Diagnostika perspektivních elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D. [online]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/16819?locale-attribute=cs>
- [14] Autor neuveden. *Odbouratelná mastnota*. Praha: Ekolist, 2006. [online]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/odbouratelna-mastnota>
- [15] OOMMEN, T. V., CLAYBORNE, C. C., MULLEN, J. T., *BIODEGRADABLE ELECTRICAL INSULATION FLUIDS*. IEEE, 1997. [online]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/651191>
- [16] Firemní materiály společnosti ABB, *BIOTEMP®*, [online]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1LUS471050-LTE&LanguageCode=en&DocumentPartID=&Action=Launch>
- [17] Firemní materiály společnosti MIDEL, *MIDEL 7313 Synthetic Ester Transformer Fluid Fire safe and Biodegradable*, [online]. Dostupné z: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL-7131-Product-Brochure.pdf>
- [18] Firemní materiály společnosti MIDEL, *Fluids Comparison*, [online]. Dostupné z: <https://www.midel.com/blog/fluids-comparison>

- [19] Firemní materiály společnosti MIDEL, *MIDEL eN 1204 Natural Ester Transformer Fluid (Rapeseed) Fire safe and Biodegradable*, [online].  
Dostupné z: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/midel-en-1204-product-brochure.pdf>
- [20] Firemní materiály společnosti MIDEL, *MIDEL eN 1215 Natural Ester Transformer Fluid (Soya) Fire safe and Biodegradable*, [online].  
Dostupné z: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/midel-en-1215-product-brochure.pdf>
- [21] TOKUNAGA, J., NIKAIDO, M., KOIDE, H. a HIKOSAKA, T., *Palm Fatty Acid Ester as Biodegradable Dielectric Fluid in Transformers: A Review*. IEEE, 2019. [online]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8636104>
- [22] BLAŽEK J., RÁBL V., *Základy zpracování a využití ropy*. 2. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-619-2
- [23] TOTZAUER Pavel, *Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2015. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Mentlík, CSc. [online].  
Dostupné z:  
<https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18914/1/Vlastnosti%20perspektivnich%20el%20izolacnich%20kapalin.pdf>
- [24] KESHAVAMURTHY H.C., KRISHNASWAMY K.R. a SRIDHAR S., *RAPE SEED OIL DERIVATIVE AS A NEW CAPACITOR IMPREGNANT*. IEEE, 1994. [online]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/401430>
- [25] MENTLÍK V., TRNKA P., ULRYCH J., *Kapalina šetřící životní prostředí*. A-Z ELEKTRO, 2017. [online].  
Dostupné z: <http://www.azcasopis.cz/casopis/2017/5-6/82/>
- [26] MICHAL O., MENTLÍK V., TRNKA P., HORNAK J., TOTZAUER P., *Dielectric Properties of Biodegradable Vegetable Oil Based Nanofluid*. IEEE, 2018. [online]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8396036>
- [27] SMETANA Vojtěch, *Elektroizolační kapaliny*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2014. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Trnka Ph. D. [online]. Dostupné z:  
[https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/12366/1/Smetana\\_Vojtech\\_Elektroizolacni\\_kapaliny\\_E12N0150P.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/12366/1/Smetana_Vojtech_Elektroizolacni_kapaliny_E12N0150P.pdf)

- [28] TOTZAUER Pavel, *Aspekty používání biodegradabilních elektroizolačních kapalin*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2019. Disertační práce. Školitel doc. Ing. Pavel Trnka Ph. D.
- [29] FRIČL Patrik, *Vliv vlhkosti na EIS olej – papír*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2019. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Trnka Ph. D. [online]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/37480/1/Fricl%20-%20diplomova%20prace%20TISK.pdf>
- [30] Firemní materiály společnosti Airproducts, [online]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/Industries/FoodBeverage/OilsFats/product-list/hydrogenation-oilsfats.aspx?itemId=6C88A8797C704DCD9F5C77435AC7743F>
- [31] NAVRÁTILOVÁ Miloslava, *Nenasycené uhlovodíky*. [online]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/13102212/>
- [32] Autor neuveden, *Karboxylové kyseliny a jejich deriváty*. [online]. Dostupné z: [https://www.mojechemie.cz/Organick%C3%A1\\_Chemie:Karboxylov%C3%A9\\_kyseliny\\_a\\_jejich\\_deriv%C3%A1ty](https://www.mojechemie.cz/Organick%C3%A1_Chemie:Karboxylov%C3%A9_kyseliny_a_jejich_deriv%C3%A1ty)
- [33] Burzovní informace, [online]. Dostupné z: <https://www.indexmundi.com/commodities/>
- [34] NÁDVORNÍKOVÁ Martina, *Křivka cen potravinových komodit posiluje*. Agrární komora české republiky, 2021. [online]. Dostupné z: <http://www.akcr.cz/txt/krivka-cen-potravinovych-komodit-posiluje>
- [35] Firemní materiály společnosti Oleje.cz, [online]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/p/mogul-trafo-cz-a-1-l-nalevany--18444>
- [36] Firemní materiály společnosti Edenoil, [online]. Dostupné z: <https://www.edenoil.co.uk/component/virtuemart/6/transformer-insulating-liquid>

## Přílohy

**Příloha A** – Srovnávací tabulka komerčně vyráběných biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin

	BIOTEMP	MIDEL 7131	MIDEL eN 1204	MIDEL eN 1215
Elektrická pevnost $E_p$ při 25 °C	45 (kV/2,5mm)	>75 (kV/2,5mm)	>75 (kV/2,5mm)	>75 (kV/2,5mm)
Viskozita při 0 °C	300 (mm <sup>2</sup> /s)	233 (mm <sup>2</sup> /s)	232 (mm <sup>2</sup> /s)	206 (mm <sup>2</sup> /s)
Viskozita při 100 °C	10 (mm <sup>2</sup> /s)	5,3 (mm <sup>2</sup> /s)	8,3 (mm <sup>2</sup> /s)	7,6 (mm <sup>2</sup> /s)
Bod vzplanutí	330 °C	260 °C	>260 °C	>260 °C
Bod tuhnutí	-15 až -25 °C	-56 °C	-31 °C	-18 °C
Ztrátový činitel $tg\delta$ při 25 °C	0,0015	-	-	-
Ztrátový činitel $tg\delta$ při 90 °C	-	<0,008	<0,03	<0,03
Ztrátový činitel $tg\delta$ při 100 °C	0,002	-	-	-
Relativní permitivita $\epsilon_r$	3,2	3,2	3,1	3,1
Rezistivita při 90 °C	-	>20 (G $\Omega$ ·m)	-	-
Rezistivita při 100 °C	100 (G $\Omega$ ·m)	-	-	-
Číslo kyselosti	0,075 (mg KOH/g)	<0,03 (mg KOH/g)	<0,1 (mg KOH/g)	<0,07 (mg KOH/g)
Korozivní síra	Nepřítomna	Nepřítomna	Nepřítomna	Nepřítomna
Obsah vody	150 (mg/kg)	50 (mg/kg)	50 (mg/kg)	50 (mg/kg)

**Příloha B** – Srovnávací tabulka experimentálních biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin

	Ester kyseliny palmitové	methylester řepkového oleje	ENVITRAFOL	ENVITRAFOL modifikovaný nanočásticemi
Elektrická pevnost $E_p$	94 (kV/2,5mm)	60 (kV/2,5mm)	60,3 (kV/2,5mm)	70,22 (kV/2,5mm)
Viskozita při 25 °C	-	8 (mm <sup>2</sup> /s)	-	-
Viskozita při 40 °C	5,06 (mm <sup>2</sup> /s)	-	35,84 (mm <sup>2</sup> /s)	-
Viskozita při 100 °C	1,79 (mm <sup>2</sup> /s)	-	8,6 (mm <sup>2</sup> /s)	-
Bod vzplanutí	178 °C	240 °C	-	-
Bod tuhnutí	-37,5 °C	-10 °C	-24 °C	-
Ztrátový činitel $tg\delta$ při 90 °C	0,007	-	0,00358	-
Relativní permitivita $\epsilon_r$	2,94	3,0	-	-
Rezistivita při 27 °C	-	190 (G $\Omega$ ·m)	-	-
Rezistivita při 80 °C	130 (G $\Omega$ ·m)	-	19,6 (G $\Omega$ ·m)	36,07 (G $\Omega$ ·m)
Číslo kyselosti	0,04 (mg KOH/g)	<0,0001 (mg KOH/g)	0,011 (mg KOH/g)	-
Korozivní síra	-	-	Nepřítomna	-
Obsah vody	52 (mg/kg)	-	45,8	-
Obsah inhibitoru	-	-	0,53	-