

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin

Pavel Totzauer

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel TOTZAUER**
Osobní číslo: **E13N0030P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vlastnosti 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 :

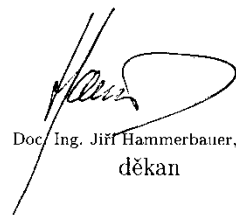
1. Provedte rozbor nároků na elektroizolační kapaliny
2. Na základě provedeného rozboru - bod1- stanovte vlastnosti limitující aplikovatelnost elektroizolačních kapalin
3. Stanovte diagnostický systém pro určení vlastností elektroizolačních kapalin

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006
2. Mentlík, V, et all: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin

Diplomová práce se zabývá popisem aktuální situace v oblasti elektroizolačních olejů a trendů v jejich používání, jakož i popisem jednotlivých parametrů kapalin a způsobu jejich měření.

Na začátku je nastíněn stručný náhled do historie a vývoje elektroizolačních kapalin, načež navazuje popis jednotlivých používaných druhů kapalin. Největší prostor je věnován rostlinným olejům, jmenovitě řepkovému a slunečnicovému oleji jakožto lokálně dostupným rostlinným olejům. Další část práce se věnuje popisu jednotlivých elektrických, fyzikálních a chemických parametrů elektroizolačních kapalin a jejich měřením. Většina těchto parametrů je již popsána vlastní normou, ta je vždy uvedena a odkazuje se na ni. Poslední část diplomové práce se věnuje měření vlivu elektrické degradace na elektroizolační systém, kdy byl jako elektroizolační kapalina použit slunečnicový a řepkový olej, jakož zástupci lokálně dostupných, a tedy levně vyrobitelných olejů. To odpovídá aktuálním trendům v elektrotechnice. Výsledkem je doporučení rostlinných olejů k praktické aplikaci.

Klíčová slova: minerální, rostlinný olej, slunečnicový, řepkový, elektrická degradace, elektroizolační systém

58 stran

21 obrázků

24 tabulek

1 příloha

Features of promising electrical insulating liquids

This diploma thesis describes the current situation in the field of electrical insulating oils and trends in their usage, as well as the description of the individual parameters of liquids and their measuring methods.

At the beginning there is a brief insight into history and development of electrical insulating liquids, then followed by description of used the fluid types. The main part is devoted to vegetable oils, namely rapeseed and sunflower oil as locally available vegetable oils. Next part is dedicated to description of the individual electrical, physical and chemical parameters of electrical insulating liquids and their measurements. Most of these parameters are already described by their own standard which is always mentioned and referred to. The last part of the diploma thesis is devoted to measuring the impact of electrical degradation to the electro-insulating system with sunflower and rapeseed oil used as insulation fluid, which are the representatives of the locally available and therefore inexpensively manufacturable oils. That corresponds to current trends in electrical engineering. This part results in a recommendation of vegetable oils to practical application.

Key words: mineral, vegetable oil, sunflower, rapeseed, electric degradation, electro-insulating system

58 pages

21 pictures

24 tables

1 appendix

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 5.5.2015

Pavel Totzauer

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za systematické vedení, rady, a připomínky během zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Jaroslavu Bartoňovi za pomoc při realizaci experimentální části a celému kolektivu Katedry technologií a měření za rady a pomoc při zpracovávání. Rovněž bych rád využil tyto řádky pro vyjádření vděčnosti své rodině za dlouhodobou podporu během studia.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
1 VÝVOJ KAPALNÝCH IZOLANTŮ.....	11
1.1 POČÁTKY KAPALNÝCH IZOLANTŮ.....	11
1.2 ROZVOJ MINERÁLNÍCH OLEJŮ	11
1.3 VÝVOJ SYNTETICKÝCH KAPALIN	12
1.4 DALŠÍ MÉNĚ POUŽÍVANÉ KAPALINY.....	13
1.5 AKTUÁLNÍ TREND ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN.....	14
2 DRUHY ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN.....	16
2.1 POŽADAVKY NA ELEKTROTECHNICKÉ KAPALINY	16
2.2 MINERÁLNÍ OLEJ	16
2.2.1 <i>Regenerace minerálního oleje</i>	<i>19</i>
2.3 ROSTLINNÉ OLEJE	20
2.3.1 <i>Fyzikální a další vlastnosti</i>	<i>23</i>
2.3.2 <i>Biologická degradabilita</i>	<i>24</i>
2.3.3 <i>Řepkový olej.....</i>	<i>25</i>
2.3.4 <i>Slunečnicový olej</i>	<i>26</i>
2.3.5 <i>Další zástupci rostlinných olejů.....</i>	<i>27</i>
2.4 SYNTETICKÉ OLEJE	29
3 PARAMETRY ELEKTROTECHNICKÝCH KAPALIN.....	32
3.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	32
3.1.1 <i>Přeskokové napětí.....</i>	<i>32</i>
3.1.2 <i>Ztrátový činitel.....</i>	<i>33</i>
3.1.3 <i>Relativní permitivita</i>	<i>34</i>
3.1.4 <i>Vnitřní rezistivita</i>	<i>34</i>
3.1.5 <i>Konduktivita.....</i>	<i>34</i>
3.2 FYZIKÁLNÍ PARAMETRY	35
3.2.1 <i>Viskozita.....</i>	<i>35</i>
3.2.2 <i>Bod vzplanutí a hoření.....</i>	<i>37</i>

3.2.3	<i>Bod tekutosti</i>	37
3.2.4	<i>Barva kapaliny</i>	38
3.3	CHEMICKÉ PARAMETRY	38
3.3.1	<i>Obsah vody</i>	38
3.3.2	<i>Oxidační stabilita</i>	39
3.3.3	<i>Obsah a vliv inhibitoru</i>	39
3.3.4	<i>Číslo kyselosti</i>	39
3.3.5	<i>Množství kalu a nečistot</i>	40
4	VLIV ELEKTRICKÉHO NAMÁHÁNÍ NA PŘÍRODNÍ ESTEROVÉ OLEJE	41
4.1	DEGRADAČNÍ FAKTORY PŮSOBÍCÍ NA EIS	41
4.1.1	<i>Modely stárnutí materiálu</i>	42
4.1.2	<i>Elektrické namáhání elektroizolačních systémů</i>	43
4.2	POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ A METODIKY MĚŘENÍ.....	43
4.3	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	45
4.3.1	<i>Odolnost střídavému napětí</i>	46
4.3.2	<i>Odolnost stejnosměrnému napětí</i>	47
4.3.3	<i>Shrnutí měření</i>	48
4.3.4	<i>Doplnění o měření výbojové činnosti</i>	49
5	ZÁVĚR	50
	LITERATURA	52
	PŘÍLOHY	55

Seznam symbolů a zkratk

C	konstanta viskozimetru
t	střední doba průtoku kapaliny viskozimetrem
R, L	rozměry kapiláry
Q	objemový průtok
AC, DC	střídavé, stejnosměrné napětí
HTH	high molecular weight
EIS	elektroizolační systém
DBPC, DBP, BHT	typy inhibitorů
PCB	polychlorované bifenoly
ČSN	označení Českých technických norem
KOH	hydroxid draselný
NaOH	louh sodný
E	intenzita elektrického pole [kV/mm]
f	frekvence [Hz]
Up	přeskokové, průrazné napětí [kV]
C _x	kapacita nádoby s měřenou kapalinou
C ₀	kapacita prázdné nádoby
cSt	centistoke, jednotka viskozity, 1 cSt = 1 mm ² ·s ⁻¹
p _z	tlakový spád na kapiláře
tg δ	ztrátový činitel
γ	vodivost [S/m]
ε _r	relativní permitivita
η	dynamická viskozita
ν	kinematická viskozita
ρ	hustota kapaliny
τ	doba života materiálu

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou alternativních elektroizolačních olejů. Historickým vývojem jsme se dostali do doby, kdy je nejrozšířenější, a tedy nejpoužívanější elektroizolační kapalinou minerální olej. Ten je dnes snadno dostupný, levný a má výborné vlastnosti jako elektroizolační, tak chladicí médium. V brzké době se ale může stát jeho dostupnost problematická. Jeho zdrojová surovina, ropa, se těží v dnes problematických oblastech, a k tomu je používána v mnoha jiných průmyslových odvětvích, které zrychleně vyčerpávají její omezená ložiska. Dalším problémovým hlediskem je biologická degradabilita ropných produktů, elektroizolačního oleje nevyjímaje. Z těchto důvodů vždy probíhal určitý rozvoj alternativních kapalin, které by mohly minerální olej nahradit v praktických aplikacích.

Trendem posledních let se stala ochrana a péče o životní prostředí s důrazem na biodegradabilitu oleje, proto se začala zkoumat použitelnost rostlinných olejů jako náhrada za oleje minerální. Tyto přírodní esterové oleje jsou šetrné k životnímu prostředí a jsou vyráběny z lokálně dostupných surovin. Jejich vlastnosti se ve většině případů protínají s těmi, které jsou žádoucí pro elektroizolační kapalinu. Zjišťování probíhá empirickým měřením těchto kapalin, a to ať se jedná o kapaliny čisté či jejich směsi. Výsledkem takovýchto měření jsou normy, které udávají požadavky na tyto neminerální perspektivní oleje. Ne všechny parametry, či vlivy, jsou však prostudovány. Jednou z méně prozkoumaných oblastí je vliv elektrického namáhání na životnost elektroizolačního systému s rostlinným olejem. Z toho důvodu je jedna část práce věnována měření vlivu elektrické degradace na systém s řepkovým a slunečnicovým olejem.

Praktické výsledky rozvoje perspektivních elektroizolačních kapalin můžeme pozorovat již dnes, kdy ještě stále probíhá jejich mohutný rozvoj. Na trhu jsou dostupné již (v některých případech několik let) varianty biodegradabilních elektroizolačních kapalin. Tyto kapaliny vykazují díky svému rozdílnému fyzikálně-chemickému charakteru výborné výsledky z praktického nasazení, kdy v některých parametrech předčí minerální oleje. Na některých vlastnostech a variantách olejů je však třeba dále pracovat. Problémem se zatím jeví vyšší cena takovýchto olejů, proto je nutné dále studovat možnost většího nasazení lokálních surovin či jejich směsí pro dosažení optimální rovnováhy mezi vynikajícími vlastnostmi a konkurenceschopnou cenou.

1 Vývoj kapalných izolantů

1.1 Počátky kapalných izolantů

První potřeba elektricky izolovat se objevila spolu s pokusy zabývajících se elektrickým polem. Již Michael Faraday v roce 1831, nebo Joseph Henry v roce 1832, izolovali své cívky papírem a hedvábím. Oleje se částečně používaly například v izolacích oceánských telekomunikačních kabelů. Pro izolaci prvního transatlantského kabelu (rok 1858) byl částečně použit lněný olej, který spolu s včelím voskem, pryskyřicí, dehtem a pytlouinou tvořil obal kolem jádra, na nějž byly naneseny vrstvy gutaperči (pružná organická látka podobná kaučuku získávaná ze stromu rodu Palaquium). *Lněný olej* je přírodní vysychavý esterový olej získávaný ze semen lnu, používán spíše jako pojivový materiál než samostatná kapalina. Dnes již bez významnějšího elektrotechnického využití. Dalším takovým olejem je *olej ricinový*. Jedná se také o přírodní olej získávaný ze semen skočce obecného, který ale také obsahuje ricin, což je toxická látka znesnadňující jeho získávání a zpracování. To bránilo jeho většímu používání. Dnes se ovšem jedná o perspektivní olej, dokonce je snaha geneticky upravit skočec tak, aby jeho semena již ricin neobsahovala. To by rozhodně jeho rozšíření napomohlo. Složením je velmi specifický – z 90% mastná kyselina ricinolejová. Měřením jeho vlastností se zabývaly studie [23 a 24], hodnoty jsou následující:

Tab. 1.1 – Vlastnosti ricinového oleje dle [23 a 24], převzato

Přeskokové napětí [kV]	viskozita při 40 °C	bod tekutosti [°C]	relativní permitivita
25.7	265	-27	15 až 35 dle teploty

Jak je z tabulky vidět, parametry ricinového oleje jsou pro elektrotechnické využití nedostačující. Kombinace nízkého přeskokového napětí, vysoké viskozity a relativní permitivity spolu s toxickými vlastnostmi skočce netvoří vhodný základ pro využití v elektroizolačních systémech.

1.2 Rozvoj minerálních olejů

Čistě kapalných izolantů bylo poprvé použito v roce 1890 v prvních třífázových transformátorech německé firmy AEG. Minerální olej, v systému olej-papír, plnil jak funkci izolačního, tak chladícího média. To konstruktérům umožnilo navyšovat výkony transformátorů až do dnešní doby. Kolem roku 1906 začalo být používání minerálního oleje na petrolejovém základě, konkrétně parafinického oleje, stále častější. Ten nahradil předchozí

šelakovou izolaci, která nedostačovala z hlediska odvodu tepla produkovaného stále výkonnějšími transformátory [17-19].

Minerální olej začal být na začátku 20. století běžně používán v elektroizolačních systémech. Vedla k tomu jeho snadná dostupnost díky těžbě na Arabském poloostrově. Problémem ovšem byly jeho vlastnosti, které souvisí s oblastní těžbou výchozí suroviny. Zde se jedná o parafinický olej, který obsahuje velké množství parafinického vosku (parafínu), který má vysoký bod tekutosti (parafín samotný se kvalifikuje bodem tání, který je kolem 45-60 °C). To ho diskvalifikuje pro použití v zařízeních při běžných teplotách. Dalším faktorem hovořícím v jejich neprospěch je vyšší viskozita. Ta přináší horší cirkulační vlastnosti a tedy menší možnost přenosu tepla ústící v kratší životnost izolace [17,18].

Parafinické oleje byly tedy nahrazovány oleji naftenickými. Jejich aromatické složky totiž zůstávají kapalné až do přibližně -40 °C, což je hodnota dostatečná i pro zimní provoz zařízení. Na konci 19. století byl hlavní těžební lokací ropné suroviny pro tento olej Mexický záliv. Oblast těžby totiž má zásadní vliv na výsledné vlastnosti rafinovaného oleje [17,18]. Toto je ale blíže popsáno v kapitole 2.1, která se zabývá minerálními oleji.

1.3 Vývoj syntetických kapalin

Po masivním používání minerálních olejů se začalo s vývojem syntetických olejů, které by dosahovaly ještě lepších vlastností než oleje minerální. Všechny dříve používané oleje měly totiž jeden zásadní nedostatek – jejich bod vzplanutí byl velice nízký a tudíž jejich použití bylo spojeno s vysokým rizikem požáru. Prvním olejem, který toto vyřešil, byl Askarel, nebo též PCB (polychlorovaný bifenylyl). Je to syntetická kapalina vyvinutá a používaná díky své vysoké teplotní odolnosti a nehořlavosti. Tedy parametrům, ve kterých parafinické a naftenické oleje značně zaostávaly. První použití askarelů v transformátoru se datuje do roku 1932. Obsahoval variaci PCB známou jako Aroclor (60% chlor, 40% trichlorbenzen) [17,18,20].

Masivní používání polychlorovaných bifenylylů, díky jejich skvělým vlastnostem, pokračovalo až do poloviny 70. let 20. století, kdy se začala projevovat jejich vysoká toxicita, která spolu s jejich vysokou kumulativní schopností, měla vysokou škodlivost na životní prostředí a hlavně na člověka. V bývalém Československu byla výroba PCB zakázána až v roce 1984 [20].

Tab. 1.2 – Typické hodnoty askarelů, převzato z [21]

bod vzplanutí [°C]	není
bod tekutosti [°C]	-37
viskozita při 100, 50, 25 °C [cSt]	3, 8, 15
přeskokové napětí [kV/2.5 mm]	40
relativní permitivita	5.85

1.4 Další méně používané kapaliny

Po zákazu používání PCB za ně elektrotechnický průmysl hledal náhradu. Pro běžné použití se stále využíval minerální olej, avšak tam, kde byla důležitá vysoká tepelná odolnost, bylo potřeba Askarely nahradit. První volbou byl silikonový olej. Konkrétně se jednalo o PDMS (polydimethylsiloxan). Jeho parametry ho k tomu přímo předurčovaly. Výborné elektroizolační vlastnosti, bod vzplanutí vyšší než minerální oleje, netoxičita. Menší nevýhodou je větší viskozita a menší schopnost přenosu tepla, a z toho plynoucí větší požadavky na chlazení. K tomu se muselo při výměně za Askarely přihlídnout [21,22].

Tab. 1.3 – Typické hodnoty PDMS, převzato z [21]

bod vzplanutí [°C]	300
bod tekutosti [°C]	-55
viskozita při 100, 50, 25 °C [cSt]	16, 30, 50
přeskokové napětí [kV/2.5 mm]	35
relativní permitivita	2.5

Další alternativou k PCB je HTH, tedy high molecular weight (někdy high temperature) hydrocarbons (česky uhlovodíky s větší molekulární hmotností). Jejich vlastnosti jsou velmi podobné s minerálními oleji, až na bod vzplanutí, který je větší právě díky oné větší molekulární hmotnosti. Tato jejich typická vlastnost má vliv i na viskozitu, která je vyšší než u ostatních olejů. Nevýhodou je jejich vysoká cena. Typické hodnoty jsou vidět v následující tabulce [18,21].

Tab. 1.4 – Typické hodnoty kapalin HTH, převzato z [21]

bod vzplanutí [°C]	285
bod tekutosti [°C]	-30
viskozita při 100, 50, 25 °C [cSt]	16, 85, 350
přeskokové napětí [kV/2.5 mm]	43
relativní permitivita	2.38

Freony (chlorofluorocarbon) – nehořlavé, velmi dobré elektrické vlastnosti, ale drahé, vypařují se při běžných provozních teplotách transformátoru, tudíž špatně použitelné, poškozují ozonovou vrstvu [17, 21].

WECOSOL – tetrachloretylen (C_2Cl_4), vyroben v roce 1980, nehořlavá kapalina používaná jako příměs do minerálního oleje (výsledná směs si zachová nehořlavost), díky velice nízké viskozitě má vynikající předpoklady pro odvod tepla [18, 21]

Tab. 1.5 – Typické vlastnosti C_2Cl_4 , převzato z [21]

bod vzplanutí [°C]	není
bod tekutosti [°C]	-22
viskozita při 100, 50, 25 °C [cSt]	0.36, 0.42, 0.55
přeskokové napětí [kV/2.5 mm]	43
relativní permitivita	2.365

1.5 Aktuální trend elektroizolačních kapalin

Nejčastěji používanou elektroizolační kapalinou je dnes bezesporu minerální olej. Důvodem je jeho snadná dostupnost a funkčnost jako dielektrika zabezpečující elektrickou izolaci, stejně jako chladiwa odvádějící produkované teplo. Minerální oleje se ale vyrábějí z ropy, jejíž zásoby nejsou nekonečné, a jejíž zpracování je zátěží pro životní prostředí.

Trendem je maximální péče a ochrana životního prostředí, tudíž je nutné odstranit negativně působící vlivy těchto kapalin, ať už při jejich výrobě, nebo při jejich použití. Biodegradabilita se stává jednou z chtěných vlastností elektroizolačního oleje. Neméně důležitá je také ekonomická náročnost, zejména kvůli oblasti uplatnění. Pro méně náročné aplikace není nutné používat drahé kapaliny s co nejlepšími vlastnostmi. Přílišná ekonomická zátěž se dá omezit používáním lokálních surovin, v našich zeměpisných podmínkách se jedná o oleje slunečnicové a řepkové. Testováním těchto olejů s různými přísadami (antioxidanty,

depresanty) se zabývá například kolektiv pod vedením prof. Ing. Mentlíka, CSc. [25] na FEL ZČU v rámci projektu TAČR TA03020251 – Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí, jakož i tato práce, ve která se zkoumá vliv elektrického stárnutí na EIS (elektroizolační systém) v řepkovém a slunečnicovém oleji.

Tyto trendy již zachytili výrobci olejů. Na trhu je k dostání několik zástupců ekologicky šetrných olejů, které se již prakticky používají. Zde jenom zmíníme například přírodní oleje Envirotemp FR3, Midel EN, ABB BIOTEMP a zástupce syntetických Midel 7131. Tyto oleje jsou ale v porovnání s minerálními často i několikanásobně dražší. Jejich bližším popisem se zabývá kapitola 2, kde jsou uvedeny jejich parametry, jakož i jejich cena.

2 Druhy elektroizolačních kapalin

2.1 Požadavky na elektrotechnické kapaliny

Jak již bylo výše naznačeno, elektroizolační kapalina musí splňovat co nejvíce žádoucích vlastností. Zde jsou některé uvedené:

- Elektroizolační schopnost
- Schopnost odvodu tepla (tedy chladicí funkce kapaliny)
- Nízká viskozita
- Biodegradabilita
- Nízký bod tekutosti
- Nehořlavost nebo vysoký bod vzplanutí
- Dostupnost výrobní suroviny a cena

Ne každá kapalina ale musí splňovat veškeré tyto parametry (popis jednotlivých parametrů je uveden v kapitole 3). Například nehořlavost je vlastnost důležitá pouze pro speciální aplikace, a toto platí i pro některé další vlastnosti. Každý druh kapaliny má vlastnosti trochu jiné vycházející z různého složení, a tedy jeho použití, či úprava pro jiné aplikace, je rozdílná.

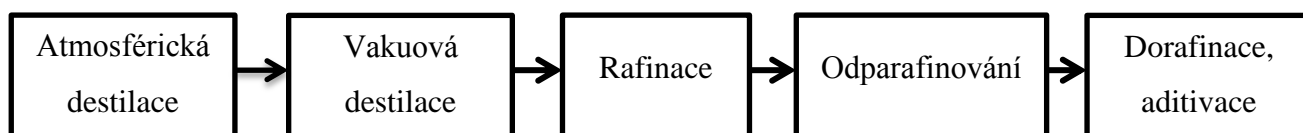
Za minimální požadavky na elektroizolační kapaliny se dnes dají vzít vlastnosti minerálního oleje, jehož popis, stejně jako dalších elektroizolačních kapalin, následuje.

2.2 Minerální olej

Z hlediska izolačního i chladicího média jsou vlastnosti minerálního oleje vyhovující. Náročná, a to jak technologicky tak ekologicky, je ale jeho výroba a následné zneškodnění v případě havárie či ukončení životnosti oleje. Protože je však jeho cena v porovnání s ostatními druhy olejů velmi nízká, je velice rozšířen. Problémem se v budoucnu stane nedostatek hlavní suroviny, ze které je vyráběn.

Vyráběn je destilací ropy, která je zbavena nečistot, anorganických solí, vody a obsahuje co nejméně sirných sloučenin. Destilace zahrnující několik etap, při kterých se odstraňují nežádoucí složky (tyto složky se postupně odpařují a kondenzují při různých teplotách). Nejprve probíhá atmosférická destilace, která odstraní lehké rafináty (např. benzín,

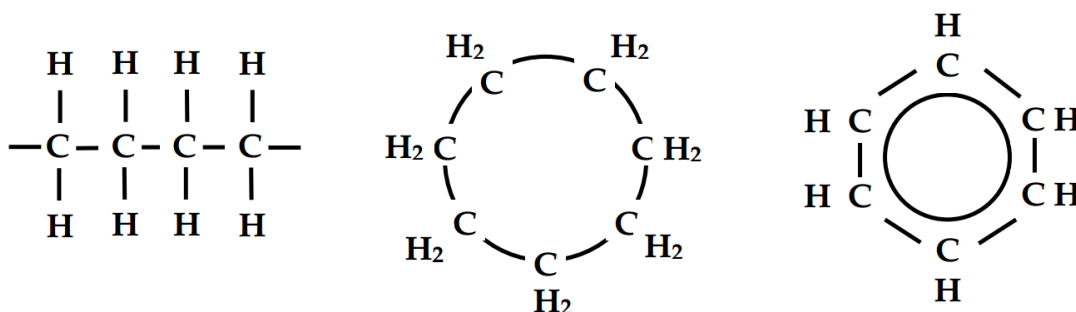
petrolej, plynový olej), poté je na řadě vakuová destilace. Tou dostáváme z mazutu vakuový plynový olej, lehké, střední a těžké oleje. Následuje rafinace, která z mazutu oddělí jednotlivé ropné frakce dle délky uhlovodíkových řetězců. Také se odstraní nežádoucí příměsi, což zlepší vlastnosti oleje pro následné použití. Dalším krokem je odparafinování, kdy se odstraní parafíny zhoršující vlastnosti při nízkých teplotách, načež navazuje dorafinace odstraňující zbytky polárních látek, a aditivace zlepšující vlastnosti oleje [1,3,4,5,57].



Obr. 2.1 – zjednodušené schéma výroby minerálního oleje

Chemicky spadají minerální oleje do kategorie uhlovodíků. Blíže je rozlišujeme do tří kategorií lišících se výrobním procesem, příměsemi (které ovlivňuje hlavně místo naleziště ropy) a cílovou oblastí použití, a to na oleje:

- Parafinické (též alkany)
- Naftenické
- Aromatické



Obr. 2.2 – uhlovodíkové vazby v minerálních olejích (zleva parafinická, naftenická, aromatická), převzato z [13]

Pro energetiku jsou nejdůležitější první dvě kategorie, které se používají na výrobu transformátorových olejů.

- **Parafinické oleje** – nasycené uhlovodíky s rozvětvenými (izoalkany, izoparafíny) a nerozvětvenými (n-alkany) řetězci, obecný vzorec C_nH_{2n+2} , chemicky stálé, lehce vyšší viskozita, vyšší bod tekutosti i vzplanutí, vyšší odolnost proti oxidaci [27]
- **Naftenické oleje** - cyklické uhlovodíky, obecný vzorec C_nH_{2n} , chemicky méně stálé, nízký bod tekutosti [27]

- **Aromatické oleje** – cyklické nenasycené uhlovodíky, obecný vzorec C_nH_{2n-6} , charakteristické svou tmavou barvou. Používají se spíše jako přísada do lepidel, gum a podobně [6,7,27].

Jako typické vlastnosti minerálních olejů můžeme uvést schopnost elektrické izolace charakterizovanou přeskokovým napětím U_p . Jeho hodnoty udává norma ČSN EN 60422 – Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních, v závislosti na nejvyšším napětí transformátoru.

Tab. 2.1 – Doporučené limitní hodnoty pro nové minerální oleje [39]

Parametr	Nejvyšší napětí pro zařízení [kV]		
	< 72.5	72.5 až 170	> 170
přeskokové napětí [kV]	> 55	> 60	> 60
obsah vody [ppm]	200	< 10	< 10
číslo kyselosti [mgKOH/g]	max. 0.03		

Dále je důležitý nízký ztrátový činitel $\text{tg } \delta \approx 0.002$. Pro reálný provoz zařízení je také důležitá funkce oleje jako chladicího média. Tuto funkci lze popsat pomocí viskozity a její tepelné závislosti. Pro 20 °C má kinematická viskozita hodnotu $\nu \approx 22$ cSt, pro 100 °C $\nu \approx 2.6$ cSt ($1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) [7]. Pro provoz je dále důležitá hodnota teploty tekutosti, která je někde kolem -50 °C.

Typickým zástupcem je minerální olej Shell Diala S3 ZX-I (dřívější název Diala DX), jehož hodnoty jsou v následující tabulce. Výrobce udává, mimo jiné, extra nízký obsah síry, vysokou oxidační stabilitu a dodání ve vysušeném stavu. Jeho cena se pohybuje kolem 120 Kč za 1 l oleje.

Tab. 2.2 – Typické hodnoty oleje Shell Diala S3 ZX-I, převzato [26]

bod vzplanutí [°C]	138
bod tekutosti [°C]	-60
viskozita při 40, -30 °C [cSt]	8, 720
přeskokové napětí [kV/2.5 mm]	> 70
ztrátový činitel	0.001

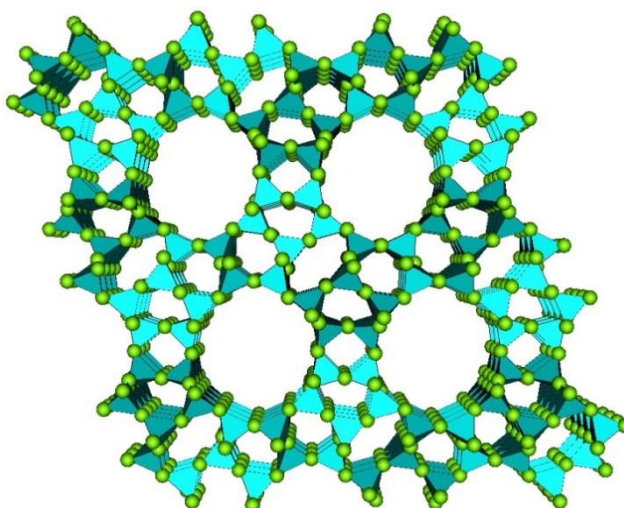
Další typickou vlastností je značné provozní stárnutí a degradace minerálních olejů. Mezi nejvíce působící vlivy patří vlhkost, teplota, elektrické pole a pevné nečistoty vznikající při provozu transformátoru. Zabránit mu lze přidáváním různých inhibitorů zpomalujících oxidační procesy v oleji, a tím prodlužují jeho životnost [28].

2.2.1 Regenerace minerálního oleje

Jiným způsobem prodloužení životnosti oleje, a tedy celého elektroizolačního systému, je celková regenerace olejové náplně. Regenerace se provádí po provedení testu hospodárnosti regenerace, kdy se zjistí aktuální parametry náplně. Jedná se o tyto parametry: přeskokové napětí, obsah vody, ztrátový činitel, kyselost, rezistivita a obsah inhibitoru. Při odběru vzorku je třeba dbát na zamezení přístupu vzduchu a vlhkosti k odebíranému oleji.

Po tomto testu se rozhodne buď o kompletní výměně oleje (v tomto případě ovšem vinutí transformátoru zůstane znečištěno) nebo o provedení regenerace olejové náplně (výhodou je současné čištění oleje i vinutí vlivem cirkulace oleje – tzv. desludging) [28].

Samotná regenerace sestává z filtrace pevných částic, fyzikálně-chemického odstraňování produktů stárnutí na sorpčním materiálu a vysoušení s odplyňováním. Jako sorpční materiál se používají zeolity, což jsou hlinitokřemičité minerály. Nejčastěji se používá Fullerova hlinka, což je porézní materiál s vysokým aktivním povrchem (až 300 m²/g), na který se částice adsorbují. Vysokého aktivního povrchu je dosaženo díky fyzikálnímu uspořádání atomů tvořící mřížku s velkým počtem dutinek a kanálků, do kterých se zachytávají částice. Tato prostorová struktura je vidět na následujícím obrázku [30].



Obr. 2.3 – struktura zeolitů, převzato [30]

Regenerační proces začíná zahřátím oleje na cca 75 °C, což umožní přechod vody adsorbované v lepence do oleje, ze kterého se následně vyfiltruje. Prvním krokem samotné regenerace je průchod filtrem o pórovitosti řádově 125 µm a následně 30 µm. Tím se odstraní hrubší nečistoty. Z filtrů jde olej do sorpčních kolon (běžně 12) obsahujících Fullerovu hlinku, zde probíhá fyzikálně-chemická regenerace oleje, díky které se odstraňují produkty stárnutí. Po průchodu kolonami se olej ještě jednou filtruje, tentokrát má filtr pórovitost 0.5 µm. Takto upravený olej je připravený do vakuové odplyňovací komory, která ho vysuší a zbaví plynů. Tím je regenerační proces dokončen. Na závěr se provede test vlastností, a případně se celý proces ještě několikrát opakuje, dokud není dosaženo žádoucích hodnot. Na závěr se doplní množství inhibitoru dle požadavků. Jako inhibitory se obecně využívají fenolické a aminové inhibitory, nejčastěji DBPK (2,6-di-terc. butylparakresol), a to v množství 0.3% hmotnosti oleje [28,29].

Sorpční kolony vydrží několik takovýchto průchodů olejové náplně, poté ztratí většinu svých sorpčních vlastností. Ty se ale navrátí reaktivací sorpčního materiálu. Ta se provádí přiváděním suchého horkého vzduchu, díky čemuž započte termochemická reakce, která sorpční materiál zbaví zachycených částic. Samotný reaktivační proces trvá přibližně 5 hodin, k čemuž je třeba připočítat dalších 8 hodin na vychladnutí sorpčních kolon. Takto zreaktivovaný sorpční materiál má vlastnosti velice blízké těm původním. Reaktivovat lze až do doby, kdy hlinka mechanicky zdegraduje [28].

2.3 Rostlinné oleje

Všechny rostlinné oleje (slunečnicové, řepkové, olivové,...) spadají do kategorie přírodních rostlinných olejů vyráběných ze zemědělských plodin. Skládají se z esterů, glycerinů, nasycených a nenasycených mastných kyselin. Na poměru nasycených a nenasycených mastných kyselin závisí výsledné vlastnosti. Vyšší zastoupení mastných kyselin zlepšuje oxidační stabilitu, větší procento nenasycených pak například nižší viskozitu [3,9].

Výrobě rostlinných olejů [8] předchází několik přípravných etap. Sklizená semena se nejprve pročistí a vysuší, následuje drcení, které zlepšuje výslednou celkovou výtěžnost oleje ze semen tím, že zvětší jejich celkový povrch. Až poté se z takto připravených semen začne získávat olej. A to buď lisováním, extrakcí nebo kombinací obou metod.

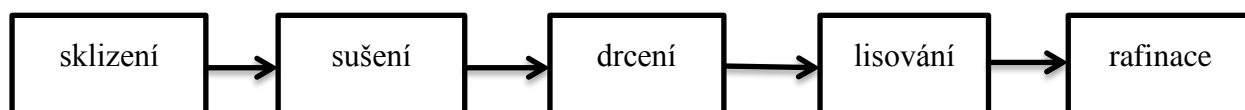
Lisování semen probíhá ve dvou etapách (předlis a dolis) při aplikaci vysokého tlaku (až 40 MPa). Těmito procesy se snižuje procento tuku v pokrutinách (zbytcích) až na 8-9 %. Při extrakci přechází jedna rozpustná pevná či kapalná složka do jiné kapalné složky. Z té se ale musí následně oddělit nějakým rozpouštědlem v závislosti na druhu oleje [8,11].

V tab. 1 je vidět výtěžnost oleje z vybraných druhů semen dle [10]. Hodnota výtěžnosti vždy vychází ze 100 kg semen, ze kterých je daný typ oleje vyráběn.

Tab. 2.3 Výtěžnost oleje ze semen, převzato z [10]

Typ semen	Řepka	Podzemnice olejná	Palmová semena	Sezam	Slunečnice	Sója	Skočec
Výtěžnost [kg]	37	42	36	50	32	14	50

Takto získaný olej ale není použitelný pro elektroizolační systémy. Obsahuje totiž mnoho složek (rozpustných, nerozpustných a kyselých), které negativně ovlivňují jeho vlastnosti. Dalším krokem je tedy zušlechťování oleje neboli rafinace. Pro technickou praxi se sestává hlavně z odkyselování, což je odstraňování volných mastných kyselin. To se děje prostřednictvím destilace, neutralizace a esterifikace. Neutralizací se rozumí odstranění volných mastných kyselin za pomoci louhu sodného (NaOH), kdy vzniká vrstva mýdla, která se pak mechanicky odstraňuje odstředěním. Pro oleje s vysokým procentem mastných kyselin (tedy s vysokým číslem kyselosti) je vhodná destilace. Při ní se olej zahřívá, kyseliny se odpaří a následně působením vakua odstraní z nádoby. Esterifikace pro odstranění kyselin využívá reakce metylalkoholu s olejem za vzniku glycerolu. Ten se následně odstraní. To vše probíhá při vakuu a vysoké teplotě [8,11].



Obr. 2.4 – zjednodušené schéma výroby rostlinného oleje

Bližší pohled na složení takto vyrobených olejů nám prozradí následující. Rostlinné oleje jsou ve skupině lipidů, ty se skládají převážně z triglyceridů, což je glycerol vázaný se třemi mastnými kyselinami. Vyznačují se převážně sudým počtem atomů uhlíku a lineárním řetězcem. Různé zastoupení těchto mastných kyselin hraje výraznou roli v určení výsledných vlastností oleje [8,12].

Mastné kyseliny se dělí dle délky řetězce (tj. počtu atomu uhlíku) na nižší (4-6), středně dlouhé (8-10) a vyšší (>12). Dále je dělíme podle stupně nasycení na nasycené a nenasyčené kyseliny [8,11,12].

- **Nasyčené mastné kyseliny**

V tabulce 2 jsou vidět základní typy nasycených mastných kyselin. Tabulka pokračuje až k počtu uhlíků C 28, nicméně pro nás jsou důležité pouze tyto. Kyselinou kaprinovou počínaje jsou totiž další vyšší kyseliny pevného charakteru, tedy jsou pro elektroizolační kapaliny irelevantní.

Tab. 2.4 Nasyčené mastné kyseliny, převzato z [11]

Mastná kyselina	Počet C	Triviální název	Bod tání
butanová	4	máselná	-4.6 °C
hexanová	6	kapronová	-1.5 °C
oktanová	8	kaprylová	16.3 °C
dekanová	10	kaprinová	31.6 °C

- **Nenasycené mastné kyseliny**

Tento typ mastných kyselin je již z hlediska rostlinných olejů významnější. Je v nich totiž výrazně zastoupen (až 90% zastoupení u řepkového oleje). Nenasycené mastné kyseliny se dále dělí dle:

- geometrické izometrie (cis- a trans-konfigurace),
- počtu dvojitých vazeb (monoénové - 1 vazba, dienové - 2 vazby, polyénové – více vazeb)
- podle umístění první dvojnásobné vazby od methylového uhlíku do rodin mastných kyselin n-9, n-6 a n-3

Tab. 2.5 Vybrané nenasyčené mastné kyseliny [8,11,12,14]

Mastná kyselina	Typ vazby / počet C	Triviální název	Jodové číslo
tetradecenová	9 cis / 14	myristoolejová	112.1
hexadecenová	9 cis / 16	palmitoolejová	99.8
oktadecenová	9 cis / 18	olejová	89.9
oktadecenová	9 trans / 18	elaidová	89.9
oktadekadienová	9,12 cis / 18	linolová	181.0
eikosatetraenová	11,14 cis / 20	arachidonová	333.5
dokosenová	n-9 / 22	eruková	75.0

V tabulce vidíme hodnoty jodového čísla. Jodové číslo udává stupeň nenasyčenosti tuku (tj. obsahu dvojných vazeb). Udává se jako množství jodu adované ve 100 g tuku. Podle něho lze rostlinné oleje dělit následovně; toto dělení nám přiblíží jejich reakci s kyslíkem ve vzduchu [14-16].

- nevysychavé – jodové číslo pod 100, při interakci se vzduchem zůstávají kapalné, např. olivový, ricinový olej
- pomalu (slabě) vysychavé – jodové číslo 110-140, na vzduchu tuhnou po delší době, např. olej mandlový a řepkový
- (rychle) vysychavé – jodové číslo nad 150, na vzduchu tuhnou po kratší době, polymerací se tvoří povrchová izolační vrstvička, např. slunečnicový, ořechový, konopný, dřevní olej, použití jako izolační laky

Zde je třeba říci, že hranice mezi kategoriemi jsou velice malé, místy zanedbatelné, rychlost vysychání závisí jak na typu mastné kyseliny, tak na poměru jejího obsahu v celém oleji.

2.3.1 Fyzikální a další vlastnosti

Rostlinné oleje, jak již bylo řečeno výše, jsou získávány z rostlin. Druh rostliny, jakož i samotná oblast jejich růstu, mají velký vliv na výsledné vlastnosti oleje. Je zde jistá paralela s minerálními oleji, jejichž vlastnosti jsou zásadně ovlivněny oblastí těžby ropné suroviny použité k jejich výrobě.

V porovnání s minerálními oleji lze říci, že rostlinné oleje mají vyšší tepelnou odolnost. To je zřetelné u bodu vzplanutí, který se u slunečnicového oleje pohybuje kolem 315 °C, respektive 320 °C u oleje řepkového. Tyto hodnoty jsou více než dvounásobné oproti minerálním olejům a vyšší než požadavky normy. Rostlinným olejům toto umožňuje použití v oblastech s důrazem na požární bezpečnost, a také jim toto dovoluje pracovat při vyšších pracovních teplotách a umožňuje jim zcela bezpečně pokrýt krátkodobá přetížení transformátorů (viz následující popis oleje FR3). Další výhodou je zanedbatelný obsah síry oproti minerálním olejům. Díky tomu nemusíme brát v potaz korozivní účinky síry a jejích sloučenin. To vše díky původu rostlinných olejů [31-33].

Značnou nevýhodou je nízký bod tekutosti. Ten se pohybuje, dle zastoupení různých druhů mastných kyselin v daném druhu oleje, v rozmezí -15 až -25 °C. To značně komplikuje jejich aplikovatelnost a funkčnost v chladnějších oblastech. Nízkoteplotní vlastnosti se dají spojit s dalším parametrem, kterým je viskozita. Její hodnota je u rostlinných olejů vyšší (až pětinašobně oproti minerálním olejům), proto nelze vyměnit minerální olej

v transformátorech za rostlinný. Vyšší viskozita totiž způsobuje větší nároky na cirkulační okruh, a to hlavně při nízkých teplotách. To, spolu s nízkým bodem tekutosti, způsobuje potenciální problematické chování. Viskozita není propojena pouze s bodem tekutosti, ale i s oxidační stabilitou. To, mimo jiné, nastiňuje Hosier et al v [34], kde uvádí naměřené hodnoty viskozity, oxidace a dielektrických ztrát u různých rostlinných druhů olejů. Z výsledků lze tvrdit, že z měřených olejů je pro aplikace vhodný řepkový olej se všemi parametry přijatelnými, kdežto slunečnicový olej, byť v elektrických parametrech vyniká, se ukázal nedostatečný kvůli špatné oxidační stabilitě a velkému vzrůstu viskozity. Dalším neduhem rostlinných olejů je jejich sklon k navlhání. To je dáno jejich chemickou strukturou. Množství potencionálně vázané vody je, v porovnání s minerálním olejem, několikanásobné [31,32,34].

Shrnutí všech požadovaných vlastností a hodnot, spolu s odpovídající normou, nabízí následující tabulka.

Tab. 2.6 Shrnutí požadovaných vlastností přírodních esterů [49]

Vlastnost	Norma	Limitní hodnota
viskozita při 40, 100 °C	ISO 3104	50, 15 mm ² ·s ⁻¹
bod tekutosti	ISO 3016	max. -10 °C
obsah vody	IEC 60814	max. 200 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	min. 35 kV/2.5mm
ztrátový činitel tg δ	IEC 60247	max. 0.05
číslo kyselosti	IEC 61125	max. 0.6 mg KOH·g ⁻¹
bod vzplanutí, hoření	ISO 2719, 2592	min. 250 °C, 300 °C

2.3.2 Biologická degradabilita

Důvodem pro studování využitelnosti rostlinných olejů v elektrotechnice je hlavně jejich biologická rozložitelnost související s jejich původem. To, spolu s možností výroby z lokálních surovin, je jejich hlavní výhodou oproti minerálním olejům.

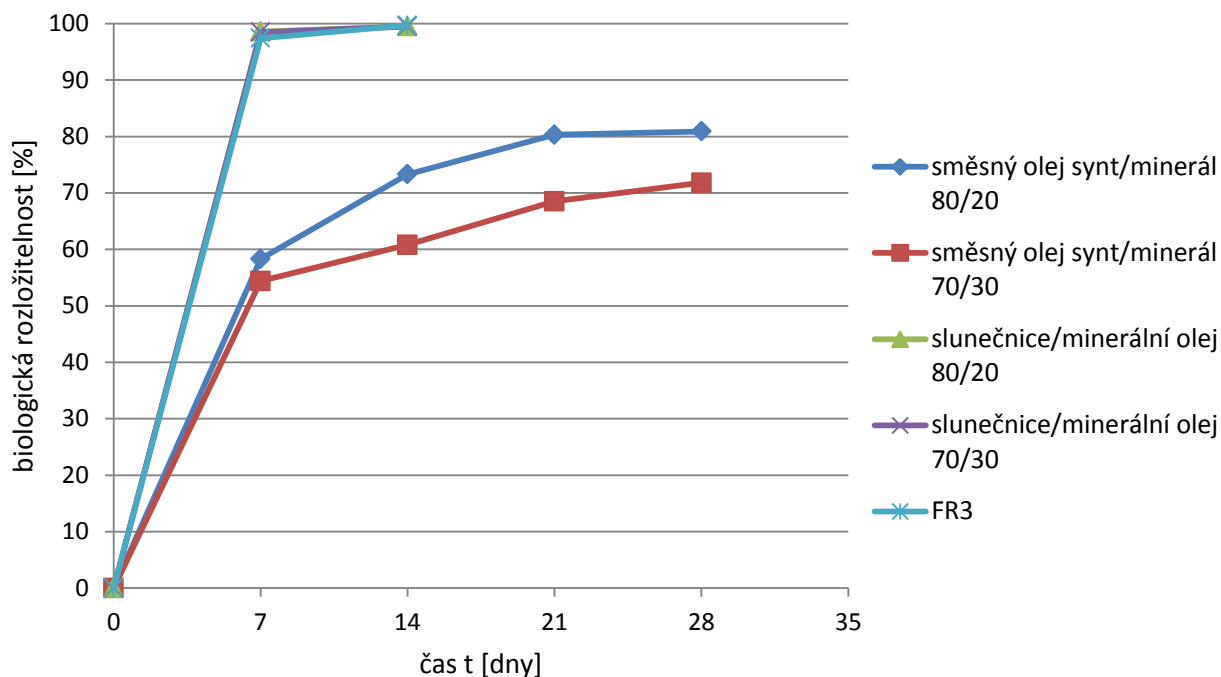
Popis (kategorizování) biologické odbouratelnosti je popsáno například v normách CEC-L-33, OECD 301, ASTM D 5864 a ISO 14593. Vždy se ale v zásadě jedná o určení míry množství přeměněné kapaliny, vlivem čisté nebo odpadní vody při 25 °C, na CO₂ za 28 dnů.

Na základě této míry se rozlišují tři skupiny kapalin:

- Problematicky biologicky odbouratelné – méně než 20 % vzorku se rozloží

- Přirozeně biologicky odbouratelné – 20 až 60 % vzorku se rozloží
- Snadno biologicky odbouratelné – minimálně 60% vzorku se rozloží

Jako názorný příklad zkoušky biodegradability olejů lze uvést měření provedené pro Katedru technologií a měření FEL ZČU. Měření bylo provedeno dle normy OECD 301-D.



Obr. 2.5 – biologická degradabilita různých olejů, zdroj katedra

Z grafu lze vidět, že kontrolní měření aktuálního stupně rozložitelnosti, se provádějí každý 7. den. Hodnocení olejů, použitých v testu, vyznívá velice kladně. Všechny oleje dosáhly výsledné rozložitelnosti minimálně 70%. Nejlepší výsledky měly směsi olejů slunečnice, a průmyslově vyráběný modifikovaný rostlinný olej FR3. Za zmínku stojí i vysoká rozložitelnost směsných syntetických/minerálních olejů. Minerální olej, byť samostatně biologicky nedegradabilní, dosáhl ve spojení se syntetickým olejem vysoké úrovně rozložitelnosti.

2.3.3 Řepkový olej

Vzhledem k praktické části diplomové práce je vhodné blíže popsat měřené oleje. Pro měření byl použit řepkový a slunečnicový olej v potravinářské kvalitě, vždy doplněný o

antioxidant v množství 0.4% hmotnosti oleje. Parametry samotného řepkového oleje jsou následující:

Tab. 2.7 – Vlastnosti řepkového oleje [25]

hustota při 15 °C [g/cm ⁻³]	kinematická viskozita při 40 °C [cSt]	tg δ při 50 Hz [-]	permitivita při 50 Hz [-]	přeskokové napětí [kV/2.5mm]	číslo kyselosti [mgKOH/g]	rezistivita 90°C [Ω·cm]
0.9211	35.70	$3.8 \cdot 10^{-2}$	3.23	51.19	0.092	$9.45 \cdot 10^7$

Řepkový olej je složen převážně z nenasycených mastných kyselin (až 98%), konkrétněji 7% nasycených mastných kyselin, 62% mononenasycených mastných kyselin a 31% polynenasycených mastných kyselin. Největší zastoupení (až 60%) má mastná kyselina olejová, následuje kyselina linolová (cca 20-30%), 5% kyselina palmitoolejová a poté v menším množství další kyseliny. Všechny výše uvedené procentní hodnoty jsou přibližné. Reálné zastoupení se liší v závislosti na odrůdě a lokalitě pěstování řepky olejky [8,25,34].

2.3.4 Slunečnicový olej

Tento olej se vyrábí ze slunečnicových semen, která musejí být řádně vyzrálá, protože olej se do semen váže až na konci vegetačního období. Běžný slunečnicový olej je složen z více než 60% polynenasycených, 20% mononenasycených a přibližně 10% nasycených mastných kyselin. Zastoupení mastných kyselin (viz. tab. 2.8) závisí na typu odrůdy slunečnice. Variant je totiž více, a každá z vyšlechtěných variant obsahuje jiné zastoupení různých mastných kyselin s ohledem na budoucí využití [8,34-37].

Tab. 2.8 – Zastoupení mastných kyselin, převzato [37]

mastná kyselina	obsah [%]
kyselina palmitová	5 - 8
kyselina stearová	4 - 6
kyselina linolová	62 - 70
kyselina olejová	15 - 25
ostatní (výskyt pod 1%)	

Měřením elektrických a dalších vlastností slunečnicového oleje se zabývalo již velké množství studií. Krátký výtah nejdůležitějších vlastností pro elektrotechnické použití naleznete v následující tabulce 2.9, kde za zdroj dat posloužila katedrální měření.

Tab. 2.9 – Vlastnosti slunečnicového oleje [25]

hustota při 15 °C [g/cm ³]	kinematická viskozita při 40 °C [cSt]	tg δ při 50 Hz [-]	permitivita při 50 Hz [-]	přeskokové napětí [kV/2.5mm]	číslo kyselosti [mgKOH/g]	rezistivita 90°C [Ω·cm]
0.9234	32.67	0.7 · 10 ⁻²	3.16	64.31	0.042	1.03 · 10 ⁸

2.3.5 Další zástupci rostlinných olejů

V této podkapitole najdete zástupce modifikovaných rostlinných olejů, přírodních esterů a dalších olejů, u kterých se buď elektrotechnické využití uvažovalo, nebo se jich již v praxi užívá.

- **Envirotemp FR3** – zástupce přírodních esterů vyráběných z rostlinných olejů firmou Cargill, již nasazován pro použití v distribučních transformátorech o napětích až 420 kV. Jeho vlastnosti zahrnují netoxicitu, biodegradabilitu, dvounásobnou hodnotu bodu vzplanutí a hoření oproti minerálnímu oleji (330 a 360 °C), nulový obsah síry a halogenů. Vyhovuje i pro použití v chladných oblastech – bod tekutosti má hodnotu -21 °C, přičemž si zachovává dostatečnou tekutost pro efektivní přenos tepla. Množství absorbované vody je maximálně 1000 mg/kg při 25 °C. Jako jednu z hlavních výhod FR3 Cargill proklamuje schopnost operovat při vyšších teplotách, což umožňuje vyšší proudovou zátěž transformátoru nebo jeho menší rozměry. Tabulkové hodnoty udávané výrobcem jsou uvedeny v následující tabulce [43].

Tab. 2.10 – Typické vlastnosti oleje Envirotemp FR3 [43]

Vlastnost	Norma	Tabulková hodnota
viskozita při 100,40 a 0 °C	ISO 3104	8, 33, 190 mm ² ·s ⁻¹
bod tekutosti	ISO 3016	-18 ÷ -23 °C
obsah vody	IEC 60814	4 - 50 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	73 kV/2.5mm
ztrátový činitel tg δ	IEC 60247	0.02
číslo kyselosti	IEC 62021.3	0.013 – 0.042 mg KOH·g ⁻¹
bod vzplanutí, hoření	ISO 2592	330 °C, 360 °C

- **MIDEL eN** – biologicky odbouratelný a nehořlavý přírodní esterový olej firmy M&I Materials Ltd. Zdrojovou surovinou je řepka olejná. Podobně jako olej FR3 má vysoký bod

vzplanutí, který umožňuje snížit riziko požáru v exponovaných lokalitách na minimum (proklamovaný záznam 100% bezpečnosti použití). Další vlastností je vysoká absorpce vody (1100 ppm při 20 °C) v oleji beze změny elektroizolačních vlastností, což zvyšuje životnost celého elektroizolačního systému. Jeho biodegradabilita je 97% po 28 dnech.

Tab. 2.11 – Typické vlastnosti oleje Midel eN [44]

Vlastnost	Norma	Tabulková hodnota
viskozita při 100,40 a 0 °C	ISO 3104	9, 37, 234 mm ² ·s ⁻¹
bod tekutosti	ISO 3016	-31°C
obsah vody (při dodání)	IEC 60814	max. 200 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	>75 kV/2.5mm
ztrátový činitel tg δ	IEC 60247	<0.005
číslo kyselosti	IEC 62021.3	<0.05 mg KOH·g ⁻¹
bod vzplanutí, hoření	ISO 2592	327, 360 °C

- **ABB Biotemp** – další z biologicky degradabilních (97 % za 21 dní) a nehořlavých rostlinných olejů s vysokými teplotami vzplanutí a hoření od firmy ABB. Aktuálně se používá v menších distribučních transformátorech napříč USA. Jedná se o olej s vysokým obsahem nenasycených mastných kyselin, hlavní složkou je slunečnice a světlice barvířská. Takovéto složení má za cíl zlepšení oxidační stability při vystavení vzduchu. Navíc neinteraguje s konstrukčními materiály používanými v transformátoru, a to co se týče jak oxidace, tak koroze. Samozřejmě neobsahuje žádné PCB. Stejně jako FR3 či Midel eN má zvýšenou schopnost absorpce vody, což ve spojení s možností operovat při vyšších teplotách znamená větší životnost celého elektroizolačního systému [45].

Tab. 2.12 – Typické vlastnosti oleje ABB Biotemp [45]

Vlastnost	Norma	Tabulková hodnota
viskozita při 100,40 a 0 °C	ISO 3104	10, 45, 300 mm ² ·s ⁻¹
bod tekutosti	ISO 3016	-15 ÷ -25 °C
obsah vody (při dodání)	IEC 60814	max. 150 mg/kg
přeskokové napětí	ASTM D1816	65kV/2mm
ztrátový činitel tg δ (100 °C)	ASTM D924	<0.02
číslo kyselosti	IEC 62021.3	max 0.075 mg KOH·g ⁻¹
bod vzplanutí, hoření	ISO 2592	330, 360 °C

- **Ostatní rostlinné oleje** – nejenom výše uvedené rostlinné oleje z řepky nebo slunečnice mají potenciál pro elektrotechnické použití. Pro nás méně tradiční přírodní esterové oleje (sezamový, kokosový, palmový olej atd.), které jsou jinde zcela běžné, byly také cílem publikací zaměřených na jejich výkonovou analýzu. Co největší použití lokálně dostupných surovin je žádoucí, a odpovídá aktuálnímu trendu.

Vlastnostmi lokálních surovin (byť ne z hlediska našich zeměpisných souřadnic) se zabýval Naranpanawe et al. [23]. Cílem bylo porovnáním chemických a elektrických vlastností u *sezamového, kokosového a ricinového* oleje. Několik typických parametrů naměřených jeho kolektivem je vidět v následující tabulce.

Tab. 2.13 – Některé vlastnosti ostatních přírodních esterů, převzato [23]

Olej	Viskozita při 40 °C	Číslo kyselosti	Bod tekutosti
Sezamový	36 cSt	7.95 mg KOH·g ⁻¹	-9 °C
Ricinový	265 cSt	0.54 mg KOH·g ⁻¹	-27 °C
Kokosový	29 cSt	0.08 mg KOH·g ⁻¹	23 °C

Jak je vidět, problémem je, stejně jako u ostatních přírodních esterů, bod tekutosti a viskozita. Hodnoty hlavně bodu tekutosti nejsou vyhovující z hlediska praktického použití. V závěru práce je uvedeno, že sezamový a ricinový olej vykazují potenciál pro elektrotechnické využití. Autor také naznačuje, že je potřeba podniknout další výzkum s cílem zlepšení několika parametrů jako je viskozita a bod tekutosti. Toto se dá říci o všech rostlinných olejích, jelikož všechny trpí stejnými neduhy.

2.4 Syntetické oleje

Hlavní období rozmachu syntetických olejů nastalo v první polovině 20. století s rozvojem a nasazením askarelů. Důvody pro jejich použití jsou dnes stejné, jako byly dříve, a to výborná tepelná odolnost (vysoký bod vznícení a hoření) a nehořlavost. Nasazovány jsou tedy v oblastech s důrazem na požární bezpečnost, odolnost proti částečným výbojům a podobně. Mají samozřejmě výborné elektroizolační vlastnosti [46].

Syntetických olejů je velké množství druhů (jak je již naznačeno v kapitole 1.3 a 1.4). Některé druhy mají vlastnosti sobě podobné, jiné jsou naopak vyvinuty pro speciální aplikace. V možnosti vyrobit kapalinu se specifickými vlastnostmi spočívá zásadní výhoda syntetických olejů. Obecně je můžeme syntetické kapaliny rozdělit na několik skupin [5,46-48]:

- **Halogenové uhlovodíky** – příkladem je PCB; užití hlavně v transformátorech
- **Aromatické uhlovodíky** – obsahuje širokou škálu kapalin zahrnující Alkylbenzeny, polyarylalkany, polyolefiny a ftaláty. Vynikají stabilitou proti částečným výbojům, nízkou viskozitou, jiné zase vyšší permitivitou či vyšší viskozitou. Vlastnosti závisí na oblasti použití, pro kterou byly vyrobeny. Nejčastějším použitím jsou kondenzátory a kabely nebo jako náhrada za PCB [46].
 - **Nehořlavé kapaliny (s vysokým bodem hoření)** – jedná se o kapaliny HTH popisované v kapitole 1.4
 - **Silikonové oleje** – obecný termín zahrnující širokou škálu polymerů (siloxanů) jejichž základ tvoří křemík, který je základem pro řetězce podobné, jako jsou u uhlovodíků. Vlastnosti oleje závisí na délce řetězce. Olej s krátkým řetězcem má malou viskozitu, kdežto ty s dlouhým řetězcem vynikají ohnivzdorností. Dalšími vlastnostmi jsou tepelná stabilita, dobrá tepelná vodivost a odolnost proti oxidaci. Elektrické vlastnosti jsou v porovnání s minerálními oleji velice podobné, v některých případech ($\tan \delta$) je i lepší [47].
 - **Syntetické (organické) estery** – jejich struktura je velice podobná rostlinným olejům s malým rozdílem. Jejich mastné kyseliny jsou tvořeny z kratších seskupení molekul, což má vliv na výsledné vlastnosti oleje, hlavně na viskozitu, jejíž snížení poskytuje výhodu z hlediska chlazení [31]. K tomu lze přičíst dobré nízkoteplotní vlastnosti a vynikající teplotní stabilitu [48]. Nevýhodou je vysoká cena.

Tab. 2.14 Shrnutí požadovaných vlastností syntetických esterů

Vlastnost	Norma	Limitní hodnota
viskozita při 40 °C	ISO 3104	35 mm ² ·s ⁻¹
bod tekutosti	ISO 3016	max. -45 °C
obsah vody	IEC 60814	max. 200 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	min. 45 kV/2.5mm
ztrátový činitel tg δ	IEC 60247	max. 0.03
číslo kyselosti	IEC 61125	max. 0.03 mg KOH·g ⁻¹
bod vzplanutí, hoření	ISO 2719, 2592	min. 250 °C, 300 °C

Typickým zástupcem syntetických esterových olejů je **Midel 7131**, který má za sebou již 30 let praktického používání v různých oblastech od výkonových transformátorů po nasazení v transformátorech ve vlcích či větrných elektrárnách. Jedná se o netoxický, biodegradabilní olej (89% rozložitelnost za 28 dní) bez nežádoucích příměsí jako síra či těžké

kovy. Vyniká vysokými body vzplanutí a hoření, navíc se díky vysoké tepelné vodivosti ohřívá jen velice pozvolna, což oddaluje vlastní hoření. Je tedy vhodný pro použití v oblastech s důrazem na požární ochranu. Podobně jako rostlinné oleje má i Midel 7131, jakožto zástupce syntetických esterů, schopnost velké absorpce vody (až 2700 ppm). To samozřejmě prodlužuje životnost elektroizolačního systému, ve kterém je tento olej použit.

Vlastní elektrické a další parametry jsou uvedeny v další tabulce. Za povšimnutí stojí hodnota bodu tekutosti, která je ekvivalentní s minerálními oleji. [44].

Tab. 2.15 – Typické vlastnosti oleje Midel 7131

Vlastnost	Norma	Tabulková hodnota
viskozita při 100,40 a -20 °C	ISO 3104	5.25, 28, 1400 mm ² ·s ⁻¹
bod tekutosti	ISO 3016	-60°C
obsah vody (při dodání)	IEC 60814	50 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	>75 kV/2.5mm
ztrátový činitel tg δ	IEC 60247	< 0.008
číslo kyselosti	IEC 62021.3	0.01 mg KOH·g ⁻¹
bod vzplanutí, hoření	ISO 2592	260, 316 °C

3 Parametry elektrotechnických kapalin

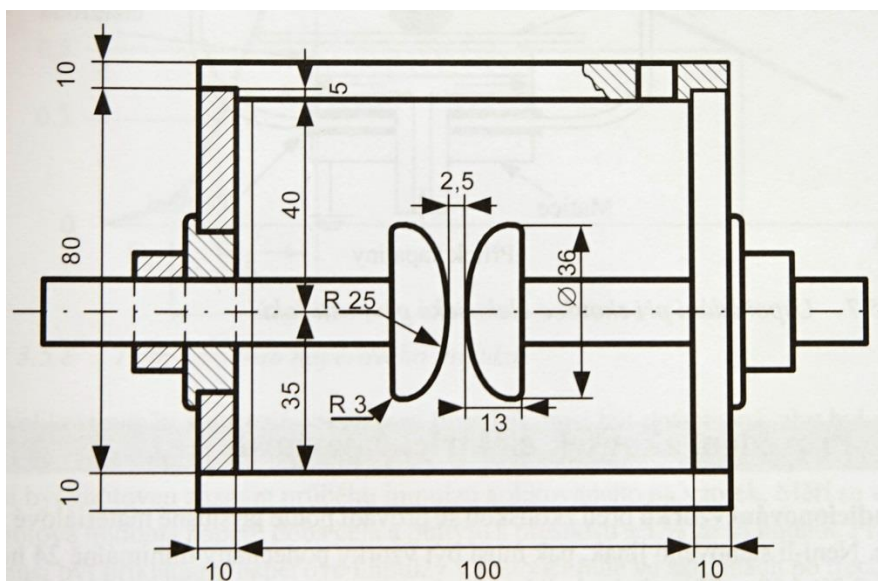
Tato kapitola se věnuje popisu základních vlastností, dle kterých elektroizolační kapaliny hodnotíme. Hodnocení je dáno ve většině případů požadavky normy, ty se ale mohou lišit v závislosti na druhu kapaliny (vlastnostem rozdílných druhů kapalin se věnovala kapitola 2, ve které jsou i uvedeny tabulky s limitními hodnotami pro daný druh kapaliny).

3.1 Elektrické parametry

3.1.1 Přeskokové napětí

Z fyzikálního hlediska není rozdíl mezi termíny přeskokové a průrazné napětí. Oba nám charakterizují stav (hodnotu), ve které elektroizolační materiál přestane plnit svou funkci a nastane jeho destrukce. Jejich rozlišení nám ale okamžitě dává informaci o skupenství materiálu. Průraz nastává pouze u pevných materiálů, přeskok zase u kapalných a plyných.

Princip zkoušky je dán normou ČSN EN 60156 – „*Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*“. Spočívá ve zvyšování úrovně napětí konstantní rychlostí (běžně 2 kV/s) a to až do doby průrazu. Měření přeskokového napětí U_p probíhá v měřicí nádobce, ve které je elektrodový systém dvou semisférických elektrod (mosaz, bronz nebo austenitická ocel) o pevné vzdálenosti 2.5 mm. Celý elektrodový systém musí být ponořen do oleje; při jeho plnění musí být kladen důraz na zamezení tvorby vzduchových bublinek v oleji, které by výrazně kompromitovaly výsledky měření. Uspořádání elektrodového systému je vidět na obr. 3.1 [28,40].



Obr. 3.1 – elektrodový systém pro měření elektrické pevnosti kapalin, převzato [28]

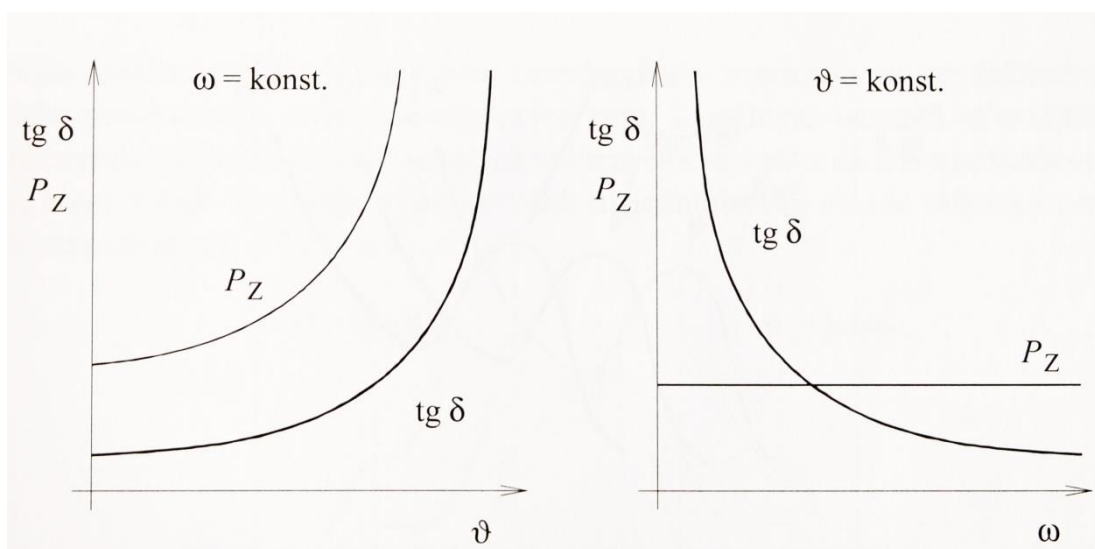
Pro možnost objektivního zhodnocení se na jedné dávce kapaliny provádí 6 průrazů za sebou s minimálně dvouminutovou prodlevou mezi každým z nich. Z těchto šesti hodnot se vypočítá aritmetický průměr přeskokového napětí, jeho směrodatná odchylka a variační koeficient v procentech. Pokud je variační koeficient větší než 20%, zkouška se musí opakovat s novou dávkou kapaliny. Pokud je i poté variační koeficient nevyhovující, nevyhovuje i izolant.

3.1.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ je ukazatelem nedokonalosti dielektrika. Vyjadřuje energii přeměněnou na teplo vlivem elektrického pole. Kdyby byl ztrátový činitel nulový, znamenalo by to, že v dielektriku nevznikají žádné ztráty, tedy že by dielektrikum bylo naprosto bezchybné (žádné příměsi, vady nebo nehomogenity v materiálu). V praxi je hodnota ztrátového činitele dobrých izolačních materiálů menší než 10^{-3} . Měření ztrátového činitele je popsáno normou ČSN EN 60247 – „Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele a rezistivity“ [50].

Velikost ztrátového činitele má vliv na stárnutí materiálu. Při ohřátí izolace se sníží rezistivita, vzroste vodivost spolu s polarizační složkou dielektrických ztrát, následkem čehož vzroste proud izolací, který způsobí její další ohřátí [28].

U nových olejů je hodnota $\operatorname{tg} \delta$ velice malá (řádově tisícinu u minerálních olejů, maximálně setiny u esterů) a je způsobována pouze vodivostí (tedy vodivostní ztráty), avšak se stárnutím kapaliny se začnou tvořit nečistoty, které zvyšují polárnost látky čímž rostou polarizační ztráty, a tedy i ztrátový činitel. Ten je závislý jak na teplotě (s růstem teploty roste), tak frekvenci (s růstem frekvence klesá) [28].



Obr. 3.2 – Teplotní a frekvenční charakteristika $\operatorname{tg} \delta$ a ztrátového výkonu P_Z , převzato z [40]

Měření probíhá v různých typech můstků (např. Scheringův můstek) obvyklým způsobem (vyvážením můstku). Lze také použít Q-metr či automatizované systémy.

3.1.3 Relativní permitivita

Určuje míru polárnosti látky, tedy vyšší permitivita ϵ znamená vyšší polárnost. Izolační kapaliny mají hodnotu ϵ_r mezi 2 a 4. Hodnota relativní permitivity se dá vypočítat jako podíl kapacity nádoby s měřenou kapalinou ku kapacitě prázdné nádoby (s vakuem či v technické praxi vzduchem).

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (3-1)$$

kde	ϵ_r	relativní permitivita [-]
	C_x	kapacita nádoby s měřenou kapalinou
	C_0	kapacita prázdné nádoby

Měření probíhá stejnými metodami jako u ztrátového činitele, neboť je popsáno ve stejné normě ČSN EN 60247.

3.1.4 Vnitřní rezistivita

Tento parametr má, spolu s předchozími dvěma, vypovídající hodnotu o kvalitě izolačního materiálu. Měřením se zabývá stejná norma jako u předchozích dvou parametrů, a to ČSN EN 60247 [50]. Měřicí metody jsou stejné jako pro měření ztrátového činitele.

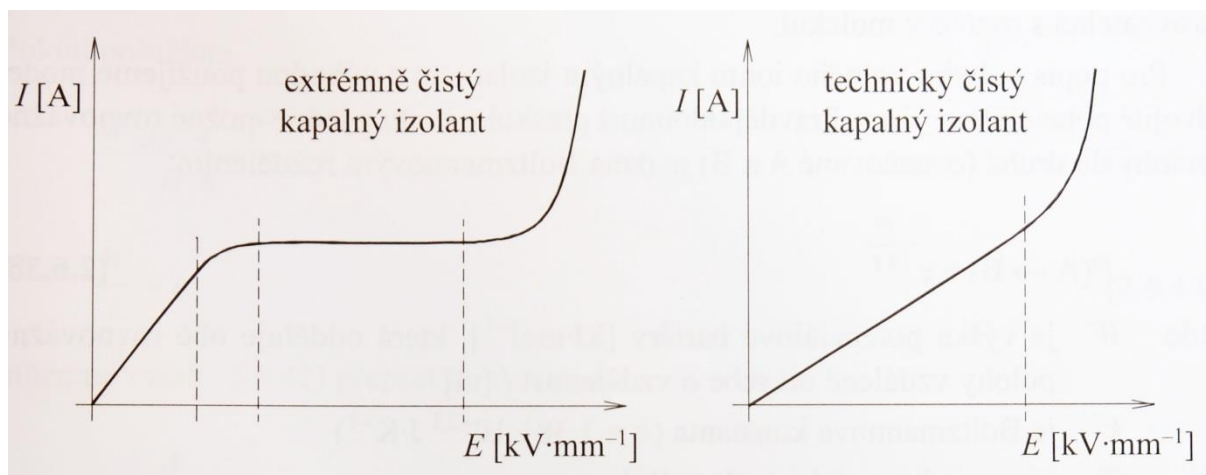
Vlastní vnitřní rezistivita (jednotka $\Omega \cdot m$ či $\Omega \cdot cm$) a její měření, je závislá na teplotě a velikosti elektrického pole. Závislost na teplotě je nepřímo úměrná, exponenciálního charakteru. Závislost rezistivity na napětí lze pozorovat na Obr. 3.3. Zpočátku se závislost řídí Ohmovým zákonem, ten však brzy přestává platit díky působení nárazové ionizace, která způsobí exponenciální nárůst procházejícího proudu [40,50].

3.1.5 Konduktivita

Zjednodušeně se jedná o převrácenou hodnotu rezistivity. Nicméně samotná vodivost slouží jako kritérium pro dělení látek na vodiče, polovodiče a izolanty. Za izolanty považujeme takový materiál, který má vodivost γ menší než 10^{-9} S/m. Dále díky konduktivitě rozlišujeme kapaliny na extrémně a technicky čisté [40].

- Extrémně čisté – vodivost $\gamma \approx 10^{-14} \div 10^{-15}$ S/m. Vodivost způsobena pouze volnými nosiči náboje.
- Technicky čisté – vodivost $\gamma \approx 10^{-11} \div 10^{-12}$ S/m. Vyšší vodivost způsobena větší koncentrací volných nosičů náboje a pak dále příměsemi (nečistotami) v kapalině.

Na Obr. 3.3 je vidět rozdíl mezi voltampérovými charakteristikami výše zmíněných dvou druhů kapalin. Extrémně čisté kapaliny mají oblast nasyceného proudu, kterou technicky čisté kapaliny nemají. Ta umožňuje vyšší odolnost vůči elektrickému namáhání. To vše díky vyšší čistotě kapaliny.



Obr. 3.3 – Voltampérové charakteristiky elektroizolačních kapalin, převzato z [40]

3.2 Fyzikální parametry

3.2.1 Viskozita

Hodnota viskozity izolační kapaliny dává přehled o tekutosti kapaliny a její schopnosti přenosu tepla. Platí, že čím menší hodnota, tím je kapalina tekutější. Jednotkou jsou mm^2/s nebo Stoky, kdy $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Viskozitou se zabývá norma ČSN EN ISO 3104 [51]. Viskozitu dělíme na dynamickou a kinematickou.

- **Dynamická** – značí se η , jedná se o poměr působícího smykového napětí a gradientu rychlosti kapaliny. Též nazývána koeficient vnitřního tření kapaliny [51].

$$\eta = \nu \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad (3-2)$$

kde η dynamická viskozita
 ν dynamická viskozita
 ρ hustota kapaliny

- **Kinematická** – značí se ν , jde o odpor proti toku kapaliny způsobenému gravitační silou [51]. Právě tato viskozita je udávána u transformátorových olejů.

$$v = C \cdot t \quad (3-3)$$

kde	v	kinematická viskozita
	C	konstanta viskozimetru
	t	střední doba průtoku kapaliny viskozimetrem

Hodnota viskozity je závislá na teplotě – s rostoucí teplotou klesá viskozita, což je výhodné z hlediska chlazení. Z tohoto důvodu jsou udávány hodnoty viskozit pro teploty 0, 40 a 100 °C.

Druhy viskozimetrů používaných pro měření [4,28]:

- **Kapilární** (průtokové) – pro stanovení dynamické viskozity, založen na Hagen-Poiseuilově zákoně. Měrnou kapilárou o známých rozměrech je protékána kapalina o známém objemu. Měřena je doba průtoku tohoto objemu. Viskozita je následně vypočítána díky znalosti rozdílu tlaku na koncích kapiláry [4].

$$\eta = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot Q \cdot L} \quad (3-4)$$

kde	R	poloměr kapiláry
	L	délka kapiláry
	Q	objemový průtok
	p_z	tlakový spád na kapiláře

Příkladem takovýchto viskozimetrů jsou viskozimetr Ostwaldův, Ubbelohdův a podobně. Principy měření jsou vždy podobné.

- **Stokesův** (tělískový) – založen na měření doby pádu kuličky měřenou kapalinou v měrné nádobce. Rychlost průchodu kapalinou je totiž závislá na její viskozitě. Výsledná dynamická viskozita se vypočte dle [28]:

$$\eta = t(\rho_{tel} - \rho)K \quad (3-5)$$

kde	t	doba pádu kuličky
	ρ_{tel}	hustota kuličky
	ρ	hustota kapaliny
	K	konstanta kuličky

- **Rotační** – hodnota dynamické viskozity se určuje ze síly, která je potřeba k otočení rotoru ponořeného v dané kapalině [28].

3.2.2 Bod vzplanutí a hoření

Těmito body se zabývá norma ČSN EN ISO 2592 – „*Stanovení bodu vzplanutí a bodu hoření - Metoda otevřeného kelímku podle Clevelanda*“ [52]. Bod *vzplanutí* je definován jako nejnižší teplota zkušební dávky, při které aplikace zkušebního plamene způsobí zapálení jejích par a rozšíření plamene po povrchu kapaliny. Bod *hoření* je nejnižší teplota, při které se při aplikaci plamene páry zkušební dávky kapaliny zapálí a ustáleně hoří minimálně po dobu 5 sekund.

Měření obou bodů probíhá ve zkušebním kelímku, který je naplněn zkušební dávkou kapaliny. Teplota této kapaliny se konstantně zvyšuje, a v pravidelných stanovených intervalech se aplikuje zkušební plamen na kelímek. Zjištěné teploty vzplanutí a hoření se přepočtou na teplotu při standardním atmosférickém tlaku. Pro měření se používají automatické či poloautomatické analyzátory s otevřeným (Cleveland) či uzavřeným (Pensky-Martens) kelímkem, k dostání např. zde [53].

Oba body jsou důležité z hlediska požární bezpečnosti a nasazování kapalin do těchto náročných oblastí. Z výše řečeného můžeme říci, že nejvyšší hodnoty těchto bodů mají syntetické oleje. Jejich hodnoty se pohybují kolem 320 - 350 °C což je předurčuje pro aplikace s důrazem na požární bezpečnost.

3.2.3 Bod tekutosti

Dle normy ČSN EN 62770 – „*Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení*“ je definován jako nejnižší teplota, při které olej ještě teče. Samotné měření bodu tekutosti se provádí dle ČSN ISO 3016 [54], jehož definice bodu tekutosti je principiálně stejná.

Měření probíhá ve zkušební zkumavce s rovným dnem, ve které se kapalina nejprve předběžně zahřeje, a poté se předepsanou rychlostí ochlazuje, přičemž se v daných intervalech posuzuje jeho tekutost [50].

Hodnota bodu tekutosti je důležitým parametrem elektroizolačních kapalin, a to hlavně u přírodních esterů. Hodnoty bodu tekutosti se pohybují u aditivovaných rostlinných olejů kolem -15 až -30 °C (u čistých rostlinných olejů je tato hodnota ještě blíže 0 °C), kdežto minerální olej tuhne řádově až při -60 °C. To je rozhodující v oblastech s nízkou průměrnou teplotou, kde by zatuhnutí transformátoru způsobovalo problémy při spuštění [38].

3.2.4 Barva kapaliny

Dalším parametrem, dle kterého můžeme předběžně diagnostikovat elektroizolační kapaliny, je barva. Během stárnutí probíhají v oleji degradační děje a hromadí se nečistoty, čímž se olej ztmavuje. Za předpokladu znalosti výchozí barvy oleje, která je světlá (čím jakostnější je olej, tím je světlejší), můžeme sledovat průběh stárnutí dle aktuálního odstínu oleje. Barva vzorku se porovnává s barevnými standardy, výsledek se vyjadřuje číslem, případně číslem a písmenem [28].

Samotné stanovení barvy oleje probíhá jedním ze dvou způsobů [28]:

- **Objektivní** – stanovení barvy měřicím přístrojem (např. Lovibondův tintometr), který určí hodnotu absorpce světla vzorku, a tu porovná v kalorimetru s hodnotou absorpce rozpouštědla za pomoci filtrů.
- **Subjektivní** – porovnání odstínu barvy testované kapaliny s barevnými etalony zkušební technikem. Je důležité dbát na co nejlepší světelné podmínky při porovnávání.

3.3 Chemické parametry

3.3.1 Obsah vody

Voda, potažmo vlhkost, je výrazný degradační činitel vyskytující se v každém elektroizolačním systému olej-papír. Do něho se dostává nejčastěji ze vzduchu, případně vzniká jako produkt degradačních reakcí. Největší vliv má na dielektrické parametry oleje, hlavně na snížení povrchového odporu izolantu a zvýšení rizika průrazu pevné složky systému [28].

V transformátoru se voda vyskytuje v několika formách (volná, rozpuštěná, emulgovaná, reakční voda) přičemž nejdůležitější formy jsou **rozpuštěná** voda, která je vysoce rizikovým faktorem, a voda **emulgovaná**. Tu tvoří směs mikroskopických částic tvořící emulzi, která je obtížně odstranitelná. Tyto emulze se shlukují a tvoří vodivé cestičky, na kterých může docházet k přeskokům (tzv. kapalný můstek) [28].

Voda se z oleje odstraňuje při jeho regeneračním procesu, přičemž je důležité, aby se olejová náplň před regeneračním procesem zahřála na provozní teplotu, aby se co nejvíce vody uvolnilo z pevné části a absorbovalo se do oleje. U toho je udávána hodnota maximálního množství vody, které je schopen absorbovat. Takto absorbovaná voda totiž snižuje dielektrické parametry jen minimálně (viz vysoké možnosti absorpce vody uvedené u rostlinných olejů, kapitola 2.3.5). Olej ale dobře absorbuje vodu pouze při vyšších teplotách.

Při nižších teplotách (60 až 80 °C) voda přechází zpět do pevné složky izolačního systému, v němž je problematicky měřitelná i odstranitelná. Tento přechod je zapříčiněn rozdílnou schopností lepenky a oleje absorbovat vodu [28].

Měření obsahu vody v oleji nejčastěji probíhá coulometrickou titrační metodou dle Karla Fischera. Ta je založena na reakci vody s jódem, oxidem siřičitým, organickou bází a alkoholem v organickém rozpouštědle. Při elektrolytické reakci s vodou se vytvoří množství jódu odpovídající proporcionálně množství vody ve vzorku [28].

3.3.2 Oxidační stabilita

Oxidační stabilita je pro všechny izolační oleje, hlavně ty rostlinné, důležitým parametrem. Pro oleje je důležité zachovat počáteční úroveň svých vlastností po co nejdelší dobu. Tomu napomáhá netečnost, či stabilita kapaliny při oxidačních procesech v oleji. Dle normy ČSN EN 60422 [55] je definována jako schopnost oleje odolávat oxidaci při tepelné zátěži a v přítomnosti kyslíku a měděného katalyzátoru. Oxidační stabilita dává informaci o odhadované průměrné životnosti oleje v provozních podmínkách.

Hodnocení oxidační stability vychází ze zrychlených zkoušek odolnosti vůči působení degradačních činitelů jako jsou teplota, kyslík, vzduch, přítomnost kovů a působení elektrického pole. Porovnávají se hodnoty fyzikálních, elektrických a chemických parametrů na počátku a po zrychleném působení degradačních činitelů. Ze stupně zhoršení citlivých parametrů se zhodnotí stabilita oleje [28].

3.3.3 Obsah a vliv inhibitoru

Inhibitor napomáhá k zamezení či zpomalení oxidačních a jiných degradačních dějů v oleji. Jeho přidáním se zvýší celková oxidační stabilita oleje; takto ošetřené oleje označujeme jako inhibované. Pro minerální oleje se používají inhibitory fenolického typu, nejčastěji sloučeniny 2,6-di-terc-butyl-parakesol (DBPC) a 2,6-di-terc-butyl-fenol (DBP), a to v množství 0.3 %_{hmot} [55,28].

Zjišťování a doplňování obsahu (inhibitor se časem spotřebovává) inhibitoru probíhá při regeneraci oleje. Měření se provádí infračervenou spektroskopií, kolorimetrickou metodou nebo chromatografickou metodou na tenké vrstvě [28].

3.3.4 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti udává míru stárnutí oleje. Kyselost oleje je způsobena tvorbou produktů oxidačních procesů. Ty degradují papírovou složku izolačního systému, čímž

ovlivňují hlavně dielektrické vlastnosti oleje. Číslo kyselosti je dobrým ukazatelem rychlosti stárnutí oleje, a dá se podle něho určit termín výměny či regenerace oleje. Jeho měření je popsáno v normě ČSN EN 62021 [56] (verze 1 a 2 pro minerální oleje, verze 3 pro oleje neminerální) jako množství zásady, vyjádřené v miligramech hydroxidu draselného (mg KOH) na gram vzorku, potřebný k neutralizaci organických a anorganických kyselých reagujících složek. Samotná hodnota čísla kyselosti se stanovuje buď potenciometrickou metodou nebo stanovením čísla kyselosti na alkalickou modř 6B (tzv. kolorimetrická titrace) [56].

3.3.5 Množství kalu a nečistot

Hromadění nerozpustných produktů stárnutí způsobuje v transformátoru několik problémů. Nečistoty hromadící se na zařízení zhoršují přenos tepla, čímž zvyšují ztráty a urychlují tím jeho degradaci. Z hlediska parametrů se jedná o zvyšování ztrátového činitele a permitivity. Odstranění těchto částic probíhá filtrací nebo odstředěním při regeneraci oleje. Cirkulace oleje při regeneračním procesu zaručí zbavení se i nečistot usazených na částech zařízení [28].

4 Vliv elektrického namáhání na přírodní esterové oleje

Experimentální část práce se zabývala měřením vlivu elektrického stárnutí na EIS rostlinný olej-papír, a to nejprve střídavým napětím se síťovou frekvencí, a poté napětím stejnosměrným. Testovány byly řepkový a slunečnicový olej, jako zástupci lokálně dostupných biodegradabilních perspektivních olejů.

Zkoumání vlivu elektrické degradace obou napětí má své praktické opodstatnění. Vliv střídavého napětí je důležitý pro provozní vlastnosti (hlavně životnost) výkonových transformátorů jelikož izolační systém je nejcitlivější součástí celého systému. Vliv stejnosměrného napětí je zase důležitý z hlediska stále většího používání měničů napětí (AC-DC, DC-DC atd.) a přenosu výkonu stejnosměrným vedením na dlouhé trasy.

Sledovanými parametry celého experimentu byly přiložené napětí vzorku a čas do průrazu, což umožnilo stanovit křivku odolnosti působícímu namáhání EIS.

4.1 Degradální faktory působící na EIS

Vliv elektrického napětí, potažmo intenzity elektrického pole, je jeden z nejdůležitějších a nejčastějších degradačních činitelů mající vliv na elektroizolační systém. Dalšími činiteli jsou teplota, kyslík, vlhkost a produkty stárnutí hromadící se v izolační kapalině. Jejich vliv je nutno brát vždy v potaz, protože ne vždy nastane po přiložení napětí čistě elektrický průraz pevné složky elektroizolačního systému. Při dlouhodobě přiložené nižší úrovni napětí jsou v materiálu vyvolány chemické změny, které izolační materiál postupně degradují. Z těchto důvodů má nastalý průraz spíše tepelný nebo elektrochemický ráz [28,40].

- **Čistě elektrický průraz** – nárůst intenzity přiloženého elektrického pole je tak rychlý, že nestačí dojít k ohřátí izolačního materiálu (či působení jiných faktorů), u kterého dojde k okamžité destrukci v nejslabším místě izolace. Vliv ostatních degradačních faktorů je mizivý.
- **Tepelný průraz** – nebo též elektrotepelný průraz, závisí na délce doby přiloženého napětí a jeho frekvenci, jakož i na teplotě. Nehomogenity materiálu nemají obecně tak vysoký vliv na vznik průrazu, ten závisí na lokálním přehřátí působením Joulových nebo dielektrických ztrát. V těchto místech roste elektrická vodivost, což způsobuje nárůst ztrát a tedy další lokální ohřev. Tímto způsobem vznikne průraz.
- **Elektrochemický průraz** – působením dlouhodobě přiloženého napětí se v materiálu vyvolávají chemické změny (např. elektrolyza) postupně snižující výslednou elektrickou pevnost izolace. Tyto změny mohou v materiálu vyvolávat částečné výboje, které svou

činností stárnutí urychlí. Nepovažuje se za samostatný druh průrazu, protože postupná degradace vlastností samostatně nezpůsobuje výsledný průraz. Ten nejčastěji nastává jako průraz tepelný.

4.1.1 Modely stárnutí materiálu

K lepšímu porozumění stárnutí materiálů slouží modely odolnosti působícímu namáhání. Ty umožňují lepší pochopení fyzikálních dějů probíhajících v daném izolačním materiálu. Vliv pouze jednoho degradačního faktoru se dá popsat empirickými modely, nicméně při působení více faktorů najednou již tyto modely selhávají (samostatné modely jednotlivých faktorů nelze jednoduše sečíst a dostat tím celkový model) [28,38,40].

Na čistě elektrický průraz lze použít dva modely [28], a to:

- exponenciální

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (4-1)$$

- mocninný

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (4-2)$$

kde τ je doba života materiálu [h],
 E je intenzita elektrického pole [kV/mm],
 a, b, k, n jsou empiricky zjišťované konstanty.

Tyto modely jsou funkční pro jakýkoliv materiál vystavený elektrickému poli, bez závislosti na jeho struktuře, konfiguraci elektrod nebo působení dalších procesů (například částečných výbojů) v materiálu. Na modely se ale nelze úplně spolehnout. Díky dalším vlivům, a hlavně vlivu několika faktorů najednou, v některých případech (např. při působení nízkých intenzit elektrického pole) udávají nespolehlivé výsledky či přímo selhávají [28,38].

Podobné modely existují pro jednotlivé působení teploty a mechanického namáhání. Pro společné zohlednění působení více faktorů se používají vícefaktorové modely. V těch se převážně zjišťuje vzájemné působení vlivů teploty, elektrického pole a doby působení na elektroizolační systém. Problematikou dvou faktorového modelu odolnosti se zabýval např. Li et. al [41], který zkoumal společný vliv teploty a elektrického namáhání systému olej-papír [28,40].

Tyto vlivy navzájem působí buďto přímo nebo nepřímo. Přímá interakce znamená radikální změnu rychlosti degradace při vzájemném působení dvou vlivů oproti jejich samostatnému působení. Za příklad může posloužit interakce zvýšené teploty a oxidace, tedy dva děje, které samostatně mají na materiál malý vliv, avšak při společném působení materiál

degradují velice rychle. Naopak při nepřímé interakci se samostatně působící vlivy ovlivňují skrze výsledné účinky těchto samostatně působících vlivů. Příkladem je mechanické namáhání materiálu, které materiál rozrušuje, což při současném vliv elektrického pole znamená nárůst částečných výbojů v nově vzniklých trhlinách v materiálu [28,40].

4.1.2 Elektrické namáhání elektroizolačních systémů

Dělit elektrické namáhání můžeme podle druhu napětí (střídavé, stejnosměrné, pulsní), nebo můžeme zohlednit jeho další vlastnosti – tvar, frekvenci, hladiny, spojitosti či rychlost změny napětí. Zde následuje popis rozdělení z hlediska použitých druhů napětí v praktickém měření.

- **Namáhání střídavým napětím 50 Hz**

Střídavé napětí je nejrozšířenější z hlediska použití v točivých strojích a výkonových systémech. Zkoumáním tohoto druhu degradace se již dlouhodobě zabývalo mnoho studií, jejichž výsledkem jsou již platné normy, metodiky měření a zjištěné časové závislosti ovlivněných veličin (vnitřní rezistivita, ztrátový činitel,...). Princip degradace spočívá ve stárnutí maximální hodnotou přivedeného napětí, jehož změna polaritry trvá určitou dobu, a to přibližně 10 ms. [28]

- **Namáhání stejnosměrným napětím**

Důležité pro vysokonapěťové vedení a kabely se stejnosměrným proudem sloužící jako spojení mezi rozvodnými sítěmi. Růst tohoto použití DC napětí jako dálkového vedení o vysokých napětích (až 1 MV) na dlouhé vzdálenosti díky menším přenosovým ztrátám. Degradace probíhá prostřednictvím vytváření prostorového náboje v materiálu. Dalšími sledovanými parametry jsou vodivostní proud a napěťová odolnost [28].

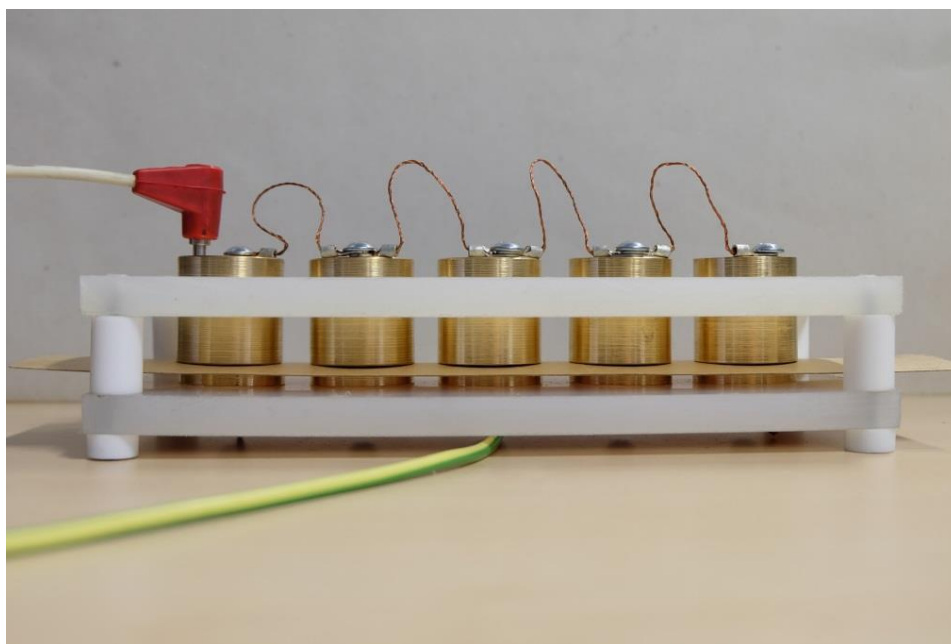
- **Namáhání napěťovými pulsy**

Nepříliš zmapovaná problematika výkonové elektroniky, konkrétně pulsních měničů, měničů kmitočtu a napětí a řízení pohonů. O tomto namáhání mluvíme v případě, že strmost napěťové hrany je vyšší než 500 V/ μ s a zároveň frekvence je vyšší než 1 kHz. Degradace nastává jak hodnotou napětí, tak jeho strmostí. Vysoká frekvence opakování způsobuje ohřev izolačního materiálu. S vysokou frekvencí také narůstá výbojová činnost [28].

4.2 Popis měřicího zařízení a metodiky měření

Systém měřicích elektrod byl navržen tak, aby simuloval elektroizolační systém olej – papír v transformátorech. Jako kapalná složka byly použity rostlinné oleje, konkrétně

slunečnicový a *řepkový* olej potravinářské kvality s přidáním inhibítorem BHT (butylhydroxytoluen) v množství 0.4% hmotnosti oleje. Konkrétní elektrické a fyzikální vlastnosti byly popsány v kapitole 2.3.3 pro řepkový olej a 2.3.4 pro olej slunečnicový. Obě tyto kapaliny splňují podmínky jako biodegradabilní kapaliny, které v případě kontaminace půdy nezpůsobí dlouhodobé komplikace v místě havárie. Z hlediska perspektivních elektroizolačních kapalin lze jejich další studium jen doporučit.



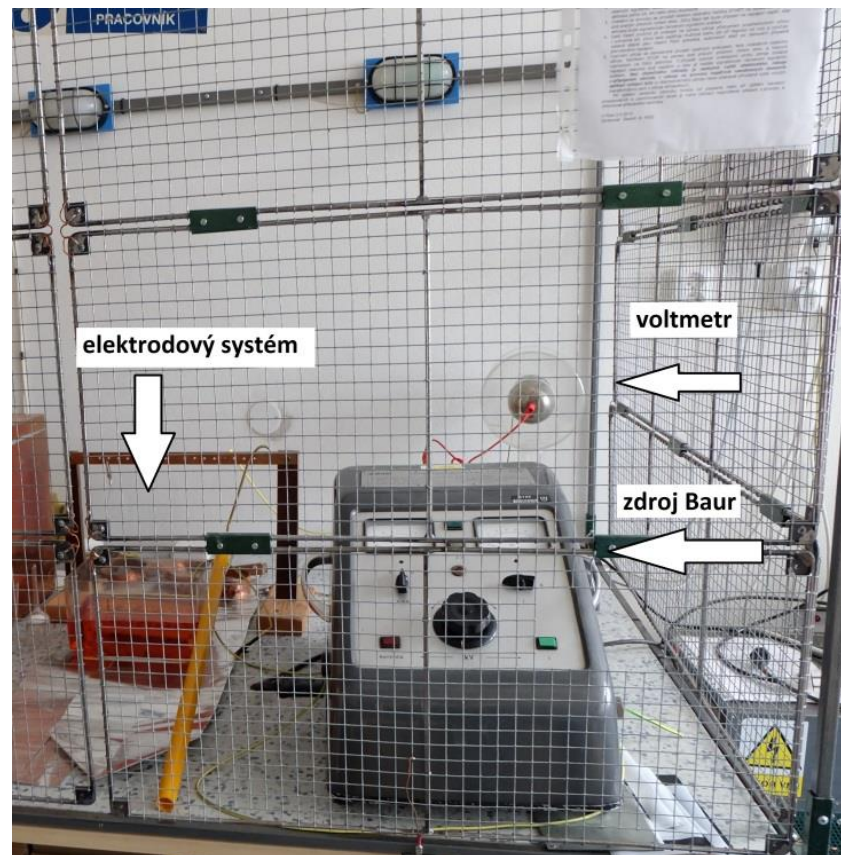
Obr. 4.1 – Použitý elektrodový systém

Jako pevná složka byla v našem případě použita lepenka Weidmann o tloušťce 0.2 mm, která byla před použitím vysušena a následně impregnována v daných olejích (slunečnicový a řepkový). Takto připravená lepenka byla vložena mezi elektrody se sraženými hranami o průměru 25 mm v elektrodovém systému (obr. 4.1), který umožňuje měřit najednou pět průrazů na jednom vzorku. Tento elektrodový systém pěti paralelních elektrod se společným přívodem napájení a společným uzemněním, byl při měření ponořen do oleje ve skleněné nádobě, která byla umístěna do vysokonapětového prostoru.

Vlastní měření odolnosti namáhání při **střídavém** napětí probíhalo v uzavřené kleci, jejíž součástí byl zdroj střídavého napětí 25 kV 50 Hz, digitální čítač doby do průrazu a automatický systém odpojení (nadproudová ochrana) pro případ průrazu.

Měření odolnosti proti namáhání při působení **stejnoseměrného** napětí probíhalo v podobně zajištěné měřicí kleci. Na obr. 4.2 vidíte zapojený měřicí obvod – skleněnou nádobu s elektrodovým systémem, zdroj stejnosměrného napětí *Baur* a kontrolní voltmetr.

Nedostatkem tohoto uspořádání byla absence automatického systému odpojení a zaznamenání času při výskytu průrazu v elektrodivém systému. To znesnadňovalo průběh měření, kdy byl nutný neustálý dozor sledující výskyt průrazu indikující se pouze výchylkou ampérmetru na zdroji Baur a slabým akustickým šuměním. Celé měření probíhalo za standardních podmínek dle normy ČSN 60212 [42].



Obr. 4.2 – Měřicí klec pro DC napětí

Metodika obou měření byla vždy stejná. Při vlastním měření se zaznamenala úroveň přiváděného napětí a čas do průrazu při dané napěťové hladině. Postupovalo se od vyšších hodnot napětí, kdy byl čas do průrazu v rámci několika minut, od kterých se úroveň napětí snižovala. To se opakovalo, dokud nebyl získán dostatečný počet bodů k sestavení křivky odolnosti napěťovému namáhání.

4.3 Vyhodnocení měření

Cílem obou částí měření bylo získat křivky odolnosti EIS vůči jednotlivým druhům napětí. Kompletní tabulky a grafy naměřených hodnot naleznete v příloze 1. V této části budou uvedeny grafy s napětím (v kV) na ose X, kdežto v příloze naleznete tytéž grafy

vyvedené s intenzitou elektrického pole na ose X. Ta umožňuje lepší obecnou porovnatelnost s jinými měřeními. Jak již bylo výše zmíněno, na jednom vzorku lepenky bylo měřeno 5 časů do průrazu. Jeden takový vzorek je vidět na obrázku 4.3. Na něm lze vidět jak díry vzniklé při průrazu vzorku, tak stopy vlivu chemické degradace v místech přiložených elektrod.



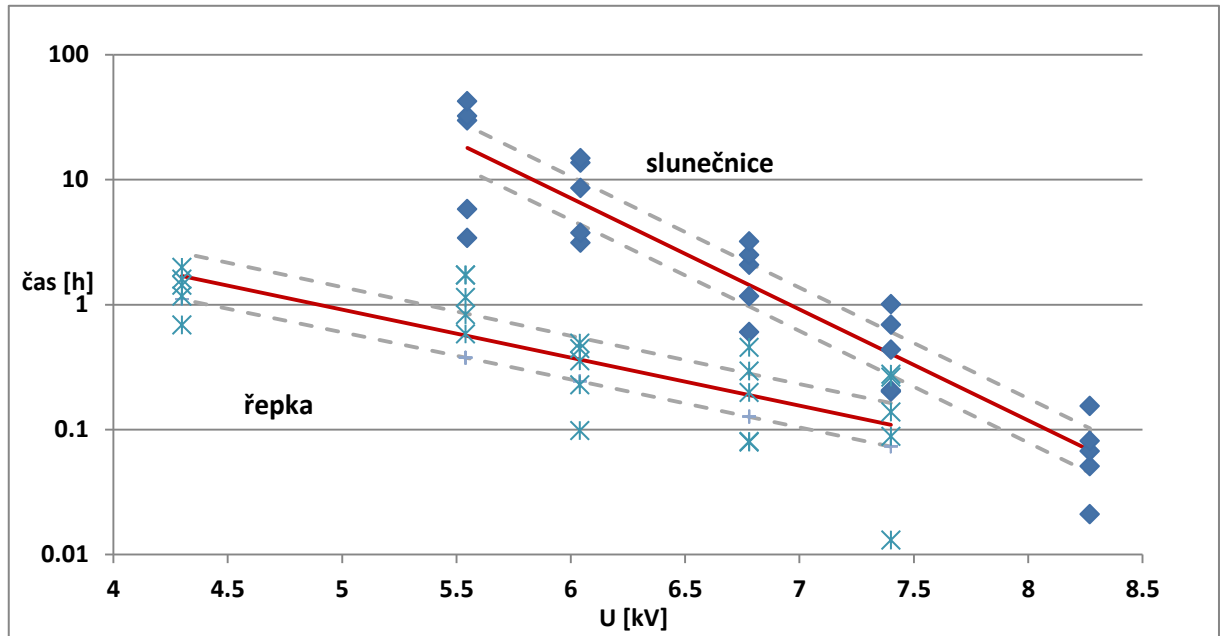
Obr. 4.3 – ukázka vzorku pevné části testovaného systému po měření

4.3.1 Odolnost střídavému napětí

Střídavé napětí je svým charakterem agresivnější než napětí stejnosměrné. To se ukázalo i na výsledcích měření, kdy hodnoty napěťových hladin byly níže než při měření namáhání napětím stejnosměrným. Hodnoty průrazných napětí se pohybovaly u obou měřených olejů na přibližně stejné napěťové hladině. Menší nedostatek se projevil při měření řepkového oleje, u kterého nebylo možno pro nižší než uvedené hladiny napětí prokazatelně určit čas průrazu, neboť systém nadproudové ochrany již nebyl schopen průraz zaznamenat (intenzita pole byla na tak nízké úrovni, že průraz by nastal chemickou degradací po několika tisíci hodinách bez možnosti jednoznačné identifikace).

Na obr. 4.4 je vidět výsledná křivka z naměřených hodnot, na které byl použit exponenciální model. Z té se při logaritmické ose Y stane přímka. Je vidět, že body

naměřených časů do průrazu, jsou roz distribuovány rovnoměrně kolem ní. Dá se tedy říci, že tyto části křivek lze použít jako základ aproximace hodnot při jiných úrovních napětí či času působení napětí (době degradace).



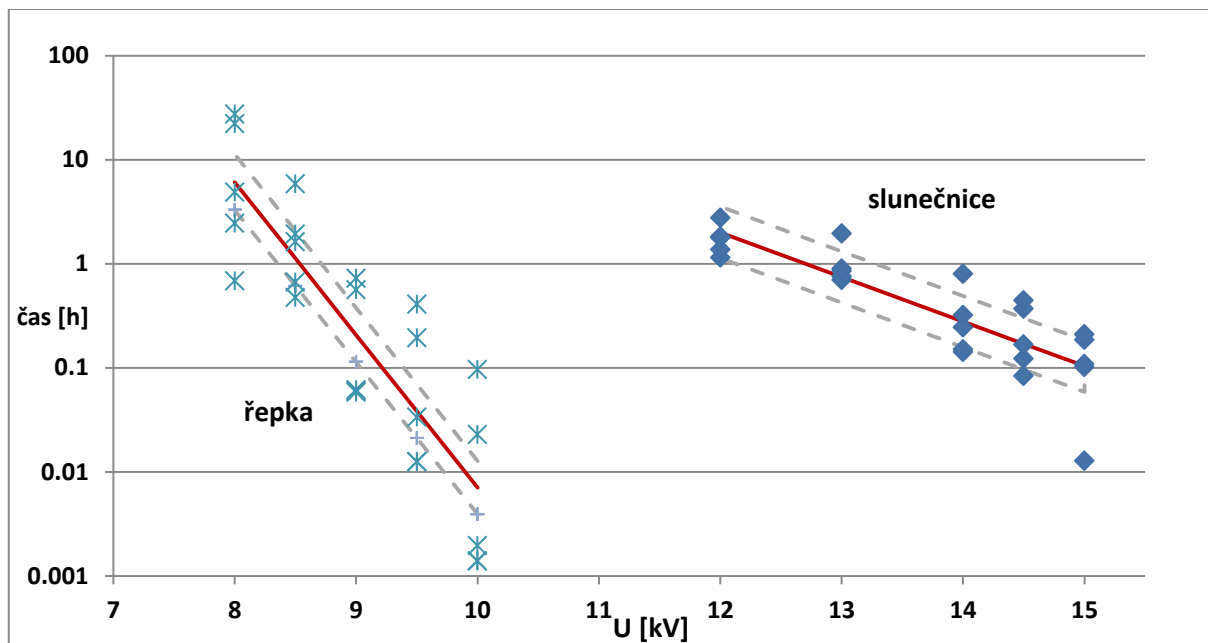
Obr. 4.4 – křivka odolnosti střídavému napětí

Oba oleje se pohybují na prakticky shodných napěťových hladinách. Porovnání rychlosti degradace slunečnicového a řepkového oleje proběhlo statistickou analýzou směrnic proložených křivek. Již na první pohled lze však vidět, která přímka má větší strmou; větší strmou znamená rychlejší stárnutí systému. Z analýzy vyplývá, že menší rychlost stárnutí má řepkový olej. Hodnoty směrnic jsou u slunečnicového oleje -2.05 , u řepkového se jedná o hodnotu -0.88 . Jejich rozdíl o hodnotě 1.16 je statisticky významným ukazatelem rychlosti degradace.

4.3.2 Odolnost stejnosměrnému napětí

Degradace stejnosměrným napětím má jiný charakter, jde o dlouhodobé působení maximální hodnoty, což není z hlediska elektrického průrazu tak agresivní. Průraz tak vzniká spíše elektrochemickou cestou. Při průrazech se tedy dají očekávat vyšší napěťové hladiny, což se i potvrdilo. Pro obdobné časy do průrazu byla napěťová hladina přibližně 1.5 násobná oproti hladinám napětí při střídavém napětí. Také je vidět již větší rozstup mezi měřenými oleji. Řepkový olej se opět pohybuje na menších napěťových hladinách, kdežto slunečnicový se pohybuje přibližně o 4 kV výše.

Rychlejší stárnutí probíhalo u EIS s použitým řepkovým olejem. Analýzou směrnic se dostaneme k rozdílu hodnot směrnic 2.39 (slunečnicový -0.99, řepkový -3.38) což je opět významný rozdíl. Graf odolnosti působení stejnosměrného napětí je vidět na další stránce.



Obr. 4.5 – křivka odolnosti stejnosměrnému napětí

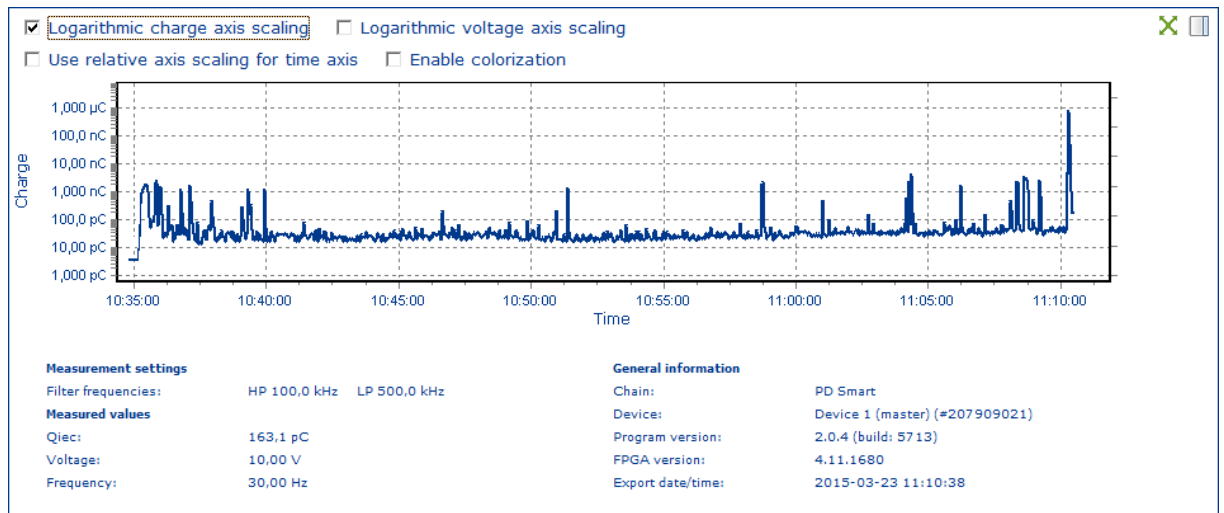
4.3.3 Shrnutí měření

Z výše popsaného měření lze uvést, následující. Pro praktické použití v zařízeních pracujícím se *střídavým* napětím lze doporučit řepkový olej, který vykazoval znatelně menší tendenci ke stárnutí. Problematická určitě není jeho nižší elektrická pevnost oproti slunečnicovému oleji, oba oleje jsou vysoko nad hodnotou, pro kterou se transformátory navrhují (3 kV/mm). Náš závěr podporuje i fakt, že řepkový olej tvoří hlavní složku již dlouhodobě používaného oleje Midel eN (jeho vlastnosti popsány v kapitole 2.3.5).

Pro použití v zařízení pracujícím čistě pod napětím *stejnoseměrným* lze doporučit olej slunečnicový, ale i řepkový. Slunečnicový vyhovuje lépe z hlediska nižší tendence k elektrickému stárnutí, avšak jeho výsledky nebyly během měření zcela předvídatelné či stálé v čase (po víkendové pauze v měření se časy do průrazu na dané napěťové hladině na jednom vzorku lehce posunuly jedním či druhým směrem; pravděpodobně způsobeno oxidačními procesy v oleji). Při měření byl kontrolován obsah vody v olejích, neprokázaly se však žádné změny. I zde však platí, že napěťové hladiny byly u obou olejů z hlediska návrhu a použití pro zařízení v provozu více než dostatečné.

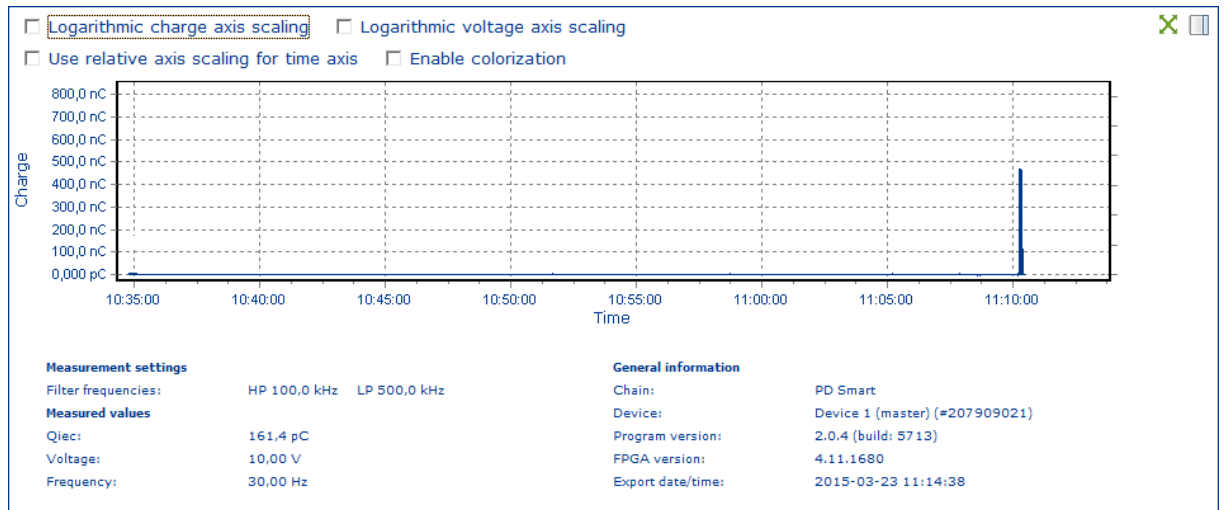
4.3.4 Doplnění o měření výbojové činnosti

Při měření vlivu stejnosměrné degradace bylo na jednom vzorku provedeno doplňující měření výbojové činnosti. Cílem bylo zachytit tendenci částečných výbojů od přiložení napětí až po finální průraz. To se podařilo. Jednalo se o EIS se slunečnicovým olejem, úroveň napětí 14 kV. Obr. 4.6 a 4.7 zachycuje výbojovou činnost na vzorku až do doby průrazu.



Obr. 4.6 – výbojová činnost, logaritmická osa y

Z grafu je vidět, že náboj jednotlivých částečných výbojů postupně roste, až po poslední výboj při průrazu, který měl náboj přibližně 475 nC. S blížícím se průrazem lze také pozorovat vyšší četnost výbojové činnosti.



Obr. 4.7 – výbojová činnost, dekadická osa y

5 Závěr

Diplomová práce se věnovala celkovému popisu situace na poli elektroizolačních kapalin. Tato oblast je nyní centrem velkého zájmu, a to zejména díky rozvoji perspektivních elektroizolačních kapalin mající za cíl nahradit minerální olej, který nevyhovuje z hlediska ochrany životního prostředí. Biodegradabilita se stává centrem zájmu a jedním z hlavních požadavků na nasazované elektroizolační kapaliny.

Nejprve byl proveden rozbor historického vývoje kapalin, ze kterého vyplývá aktuální situace. Historie se často opakuje, a to i v elektrotechnice (viz důvody vzestupu a pádu používání PCB). Dalším logickým krokem bylo ustanovení požadavků na tyto nově vyvíjené perspektivní kapaliny. Požadavky se samozřejmě částečně liší v odlišnosti na oblasti použití, ale obecně se pro porovnání hodnot kapalin dají brát vlastnosti dnes hojně používaného minerálního oleje za etalony. Důležitými parametry jsou například bod tekutosti, hodnota přeskokového napětí, viskozita a další. Dostačujících vlastností již bylo častokrát dosaženo, svědčí o tom množství dnes již v praktických aplikacích nasazovaných kapalin, jako je Midel eN, ABB Biotemp a další.

Pro lepší pochopení z čeho vycházejí vlastnosti jednotlivých druhů kapalin, a jaké mohou být zhruba jejich limity, slouží kapitola 2, která se zabývá popisem základních druhů dnes používaných elektroizolačních kapalin. Znalost těchto vlastností velice dobře poslouží pro rozlišení vhodnosti použitelnosti kapalin pro dané aplikace. Největší prostor je dán popisu rostlinných olejů, jako zástupci skupiny perspektivních elektroizolačních kapalin. Na toto navazuje kapitola třetí, která popisuje nejdůležitější elektrické, fyzikální a chemické parametry elektroizolačních kapalin. Požadavky na minerální oleje jsou velice dobře popsány a známy, avšak pro perspektivní kapaliny toto říci nelze. Pro většinu vlastností již existuje platná norma ČSN (která je v textu vždy uvedena), podle které daný parametr lze měřit a hodnotit, avšak ne vždy je známa cesta jak žádaných hodnot dosáhnout. Kombinací různých kapalin a jejich příměsí lze namíchat velké množství druhů. Cílem je dosáhnout co největší využitelnosti lokálně dostupných surovin, což by mělo žádoucí efekt na snížení výsledné ceny oleje. V aktuální době je cena dostupných perspektivních olejů několikanásobně vyšší než cena minerálního oleje.

Poslední část se věnuje měření vlivu elektrické degradace na dva zástupce lokálně dostupných perspektivních olejů, a to řepkový a slunečnicový olej. Nejprve je proveden rozbor degradačních vlivů působících na elektroizolační systém, a to hlavně elektrického namáhání. Následoval rozbor měření, kdy byl simulován elektroizolační systém olej-papír

s řepkovým a slunečnicovým olejem jako elektroizolační kapalinou. Měření bylo dvojí, nejprve vlivu střídavého a posléze stejnosměrného napětí. Cílem celého měření bylo získání křivek odolnosti působícímu elektrickému namáhání. Výsledkem experimentu bylo doporučení námi použitého řepkového oleje pro praktické aplikace, což koresponduje s dlouhodobě používaným olejem Midel eN, kde je hlavní složkou řepkový olej. Dále bylo provedeno doplňkové měření výbojové činnosti při měření vlivu degradace stejnosměrným napětím.

Z hlediska míry naplnění zadání práce můžeme říci, že bod 1 vychází z oblasti použití daných druhů elektroizolačních kapalin, jejich popisu se věnuje kapitola 1 a 2, kdy je hlavně na začátku druhé kapitoly věnován prostor požadavkům na elektroizolační kapaliny. Stanovení limitujících vlastností bylo provedeno kapitolou 3, která se věnuje popisem vlastností kapalin. Specifické tabulkové hodnoty vlastností různých druhů kapalin jsou uvedeny v kapitole 2, kde lze nalézt i faktory limitující aplikovatelnost jednotlivých kapalin. Z kapitoly 2 a 3 také vychází třetí bod zadání. Metody měření jednotlivých parametrů jsou u daného parametru vždy uvedeny, nebo je na ně odkazováno. Pro ověření jednotlivých funkcí oleje, tedy hlavně elektroizolační a chladicí, je nutno se zaměřit na parametry (viz kapitola 3) které mají spojitost s danou funkcí. Tedy pro elektroizolační funkci oleje je vhodné zkoumat vlastnosti elektrické, kdežto pro chladicí funkci spíše vlastnosti fyzikální. U vlastností mající zásadní vliv na tyto funkce je tato skutečnost uvedena při popisu daného parametru v kapitole 3. Nad rámec zadání bylo provedeno praktické měření vlivu elektrické degradace na elektroizolační systém s rostlinným olejem, jehož závěry byly již uvedeny výše.

Literatura

- [1] Petroleum.cz; VŠCHT Praha [online]. [cit. 2014-10-14]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-34.aspx>
- [2] Rouse, T.O., "Mineral insulating oil in transformers," Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.14, no.3, pp.6,16, May-June 1998 [online]. [cit. 2014-10-14]. Dostupné z: DOI: 10.1109/57.675572
- [3] Širůček, M. „Zlepšování parametrů výkonových transformátorů“. Disertační práce. [online]. [cit. 2014-11-25]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: <http://theses.cz/id/z749i3/>
- [4] Dvořák, L. „Vlastnosti tekutin“. Syllabus předmětu. Ostrava 2010. [online]. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>
- [5] Oleje.cz; Svět maziv [online]. [cit. 2014-10-21]. Dostupné z: <http://www.oleje.cz/clanek/Zakladove-oleje>
- [6] Makówka, T. „Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin“. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [7] Substances & Technologies; Dr. Dmitri Kopeliovich [online]. [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php>
- [8] Hamerská, J. „Rostlinné oleje - spotřebitelská sonda“. Bakalářská práce. [online]. [cit. 2014-10-25]. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/323462/lf_b/
- [9] Vašmucius, A. „Oleje aplikovatelné ve výkonových transformátorech“. Bakalářská práce. [online]. [cit. 2014-10-25]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: <http://theses.cz/id/5v5yx3/>
- [10] Journey to Forever; Oil yields and characteristics. [online]. [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: http://journeytoforever.org/biodiesel_yield.html
- [11] Procházková, E. „Vliv rafinace na kvalitativní parametry a stabilitu rostlinných olejů lisovaných za studena“. Diplomová práce. [online]. [cit. 2014-11-25]. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z: <http://theses.cz/id/3ihb6x/>
- [12] Fialová, L. „Mastné kyseliny“. Ústav lékařské biochemie 1. LF UK [online]. [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: http://che1.lf1.cuni.cz/html/Mastne_kyseliny_2sm.pdf
- [13] Yuliastuti, E. „Analysis of Dielectric Properties Comparison between Mineral oil and synthetic ester oil“. [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A868501da-8cae-473c-9753-b2f72de56eff/>
- [14] Studijní materiál k předmětu „Organická chemie“, MU Brno. [online]. [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/el/1431/podzim2008/C5982/lipidy1.pdf>
- [15] Moudrý, studijní materiál „Olej“, ZF JČU České Budějovice [online]. [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Olej.htm>
- [16] Koplík, R. „Lipidy“ VŠCHT Praha [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~koplíkr/Lipidy2.pdf>
- [17] Vishal, Saurabh, Vikas, Prashant „Transformer's History and its Insulating Oil“. [online]. [cit. 2015-01-17]. Dostupné z: <http://www.bvicam.ac.in/news/INDIACom%202011/45.pdf>
- [18] Sheppard, H.R., „A Century of Progress in Electrical Insulation 1886-1986,“ Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.2, no.5, pp.20,30, Sept. 1986 [online]. [cit. 2015-01-17]. Dostupné z: DOI: 10.1109/MEI.1986.290490
- [19] Lucas, J. „Historical development of the transformer“ [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://www.elect.mrt.ac.lk/Transformer_history_2000.pdf
- [20] Krčková, S. „Polychlorované bifenyly jako rizikový faktor životního prostředí“ [online]. 2007 [cit. 2015-01-30]. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/151322/prif_b/
- [21] Claiborne, C.C.; Pearce, H.A., „Transformer fluids“, Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.5, no.4, pp.16,19, July-Aug. 1989 [online]. [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: DOI: 10.1109/57.35599
- [22] Sundin, D., „Fluid choices in retrofilling PCB transformers“, Electrical Insulation, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.445,447, 7-10 Jun 1992 [online]. [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: DOI: 10.1109/ELINSL.1992.246962
- [23] Naranpanawe, W.M.L.B.; Fernando, M.A.R.M.; Kumara, J.R.S.S.; Naramapanawa, E.M.S.N.; Kalpage, C.S., „Performance analysis of natural esters as transformer liquid insulation — Coconut, castor and sesame oils“ Industrial and Information Systems (ICIIS), 2013 8th IEEE International Conference on , vol., no., pp.105,109, 17-20 Dec. 2013 [online]. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: DOI: 10.1109/ICIInfS.2013.6731964

- [24] Sankarappa, T., Prashantkumar, M. „*Dielectric properties and AC conductivity in some refined and unrefined edible oils*“ [online]. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.arcjournals.org/pdfs/ijarps/v1-i2/1.pdf>
- [25] Mentlík, V., Trnka, P., Svoboda, M. „*Elektroizolační kapaliny akcentující životní prostředí.*“ In Reotrib 2014 : kvalita paliv a maziv. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014. s. 67-72. ISBN: 978-80-7080-885-6
- [26] Shell Diala S3 ZX-I Technical Datasheet [online]. [cit. 2015-02-06]. Dostupné z: [http://www3.ikaros.net/datablad/pblad/smorjmedel%20\(Univar\)/550012592_Shell_Diala_S3_ZX-I_Dried_PBLAD.pdf](http://www3.ikaros.net/datablad/pblad/smorjmedel%20(Univar)/550012592_Shell_Diala_S3_ZX-I_Dried_PBLAD.pdf)
- [27] Trnka, P., Polanský, R. „*Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír*“ [online]. [cit. 2015-02-08]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>
- [28] Mentlík, V., et al. „*Diagnostika elektrických zařízení.*“ Praha: BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [29] Polanský, R. FEL ZČU, materiály k předmětu MSE a ústní konzultace [2015-02-28]
- [30] Zeolit [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://mineralzeolit.cz/>
- [31] Svoboda, M.; Trnka, P., „*Alternative electrical insulating fluids in power transformers,*“ Electric Power Engineering (EPE), Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on , vol., no., pp.399,402, 12-14 May 2014 [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: DOI: 10.1109/EPE.2014.6839419
- [32] Amanullah, M.; Islam, S.M.; Chami, S.; Ienco, G., „*Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid,*“ Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005. IEEE International Conference on , vol., no., pp.397,400, 26 June-1 July 2005 [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: DOI: 10.1109/ICDL.2005.1490109
- [33] Singha, S.; Viertel, J.; Unge, M.; Karlsson, J.; Johansson, K.; Faleke, H., „*Development of a natural ester liquid with significantly enhanced dielectric characteristics,*“ Dielectric Liquids (ICDL), 2014 IEEE 18th International Conference on , vol., no., pp.1,4, June 29 2014-July 3 2014 [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: DOI: 10.1109/ICDL.2014.6893132
- [34] Hosier, I.L.; Guushaa, A.; Westenbrink, E.W.; Rogers, C.; Vaughan, A.S.; Swingler, S.G., „*Aging of biodegradable oils and assessment of their suitability for high voltage applications*“ Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.18, no.3, pp.728,738, June 2011 [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: DOI: 10.1109/TDEI.2011.5931059
- [35] National Sunflower association, „*Sunflower oil fatty acid profile*“ [online]. [cit.2015-03-05]. Dostupné z: http://www.sunflowerusa.com/uploads/resources/34/sunflower-oil-fact-sheet_062510.pdf
- [36] Bertrand, Y., et al, „*Vegetable oils as substitute for mineral insulating oils in medium-voltage equipments*“ [online]. [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: <http://www.transform.ru/articles/pdf/SIGRE/d1-202.pdf>
- [37] Martinů, M. „*Studium vlastností různých rostlinných olejů*“ Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2008. 97 s. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/12886>
- [38] Trnka, P. „*Zbytková životnost elektroizolačních systémů*“. Časopis elektrově. [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.elektrově.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/65/zbytkova-zivotnost-elektroizolacnich-systemu/>
- [39] ČSN EN 60422 ed. 2 – *Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních.* Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [40] Mentlík, V. „*Dielektrické prvky a systémy*“. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [41] Li, J., Wang, Y., Bao, L. „*Two factors failure model of oil-paper insulation aging under electrical and thermal multistress*“ [online]. [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.jeet.or.kr/LTKPSWeb/pub/pubfpfile.aspx?ppseq=975>
- [42] ČSN EN 60212 – *Standardní podmínky používané před zkoušením a během zkoušení pevných elektroizolačních materiálů.* Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [43] Stránky výrobce Cargill Envirotemp FR3 [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.cargill.com/products/industrial/dielectric-ester-fluids/envirotemp-fr3/index.jsp>
- [44] Stránky výrobce M&I Materials Ltd. Midel EN a 7131 [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.midel.com/library>
- [45] Stránky výrobce ABB Biotemp [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.nttworldwide.com/docs/BIOTEMP-ABB.pdf>
- [46] Fofana, I., „*50 years in the development of insulating liquids*“ Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.29, no.5, pp.13,25, September-October 2013 [online]. [cit. 2015-04-13.]Dostupné z: DOI: 10.1109/MEI.2013.6585853

- [47] Crine, J.-P., „*Silicone oil as replacement fluid for PCBs in transformers*“ Electrical Engineering Journal, Canadian , vol.11, no.3, pp.110,113, July 1986 [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: DOI: 10.1109/CEEJ.1986.6594046
- [48] McShane, C.P., „*Natural and synthetic ester dielectric fluids: their relative environmental, fire safety, and electrical performance*“ Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 1999 IEEE. [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: DOI: 10.1109/ICPS.1999.787238
- [49] ČSN EN 62770 – *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [50] ČSN EN 60247 – *Izolační kapaliny – Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele a rezistivity*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [51] ČSN EN ISO 3104 - *Ropné výrobky - Průhledné a neprůhledné kapaliny - Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [52] ČSN EN ISO 2592 - *Stanovení bodu vzplanutí a bodu hoření - Metoda otevřeného kelímku podle Clevelanda*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [53] Verkon s.r.o. laboratorní přístroje a pomůcky. <http://www.verkon.cz/analyzatory-bodu-vzplanuti-a-tani/>
- [54] ČSN ISO 3016 – *Ropné výrobky – Stanovení bodu tekutosti*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [55] ČSN EN 60422 ed. 2 - *Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních - Návod pro kontrolu a údržbu*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [56] ČSN EN 62021 – *Izolační kapaliny – Stanovení čísla kyselosti (Část 1,2 a 3)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [57] Schejbal, V. „*Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*“. Disertační práce. [online]. [cit. 2014-11-25]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.

Přílohy

Příloha 1

Tabulky s hodnotami a grafy z měření

Tab. 1 – hodnoty měření slunečnicového oleje při AC namáhání

U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]
8.27	0.021	7.4	0.201	6.78	0.603	6.04	3.122	5.54	3.407
8.27	0.051	7.4	0.206	6.78	1.163	6.04	3.759	5.54	5.809
8.27	0.067	7.4	0.435	6.78	2.079	6.04	8.579	5.54	29.709
8.27	0.081	7.4	0.688	6.78	2.492	6.04	13.601	5.54	32.257
8.27	0.154	7.4	1.008	6.78	3.193	6.04	14.852	5.54	42.372

Tab. 2 – hodnoty měření řepkového oleje při AC namáhání

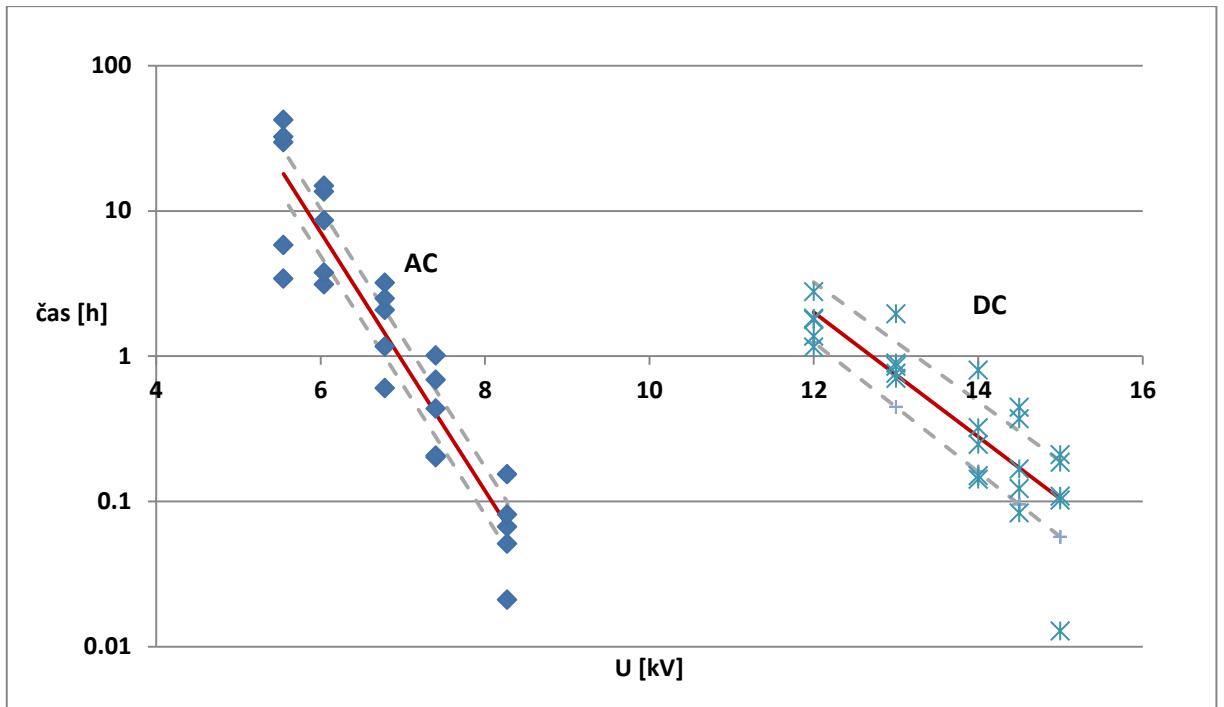
U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]
7.4	0.013	6.78	0.079	6.04	0.098	5.54	0.581	4.3	0.686
7.4	0.088	6.78	0.080	6.04	0.228	5.54	0.828	4.3	1.166
7.4	0.138	6.78	0.198	6.04	0.355	5.54	1.139	4.3	1.422
7.4	0.262	6.78	0.293	6.04	0.443	5.54	1.719	4.3	1.597
7.4	0.276	6.78	0.454	6.04	0.489	5.54	1.724	4.3	1.978

Tab. 3 – hodnoty měření slunečnicového oleje při DC namáhání

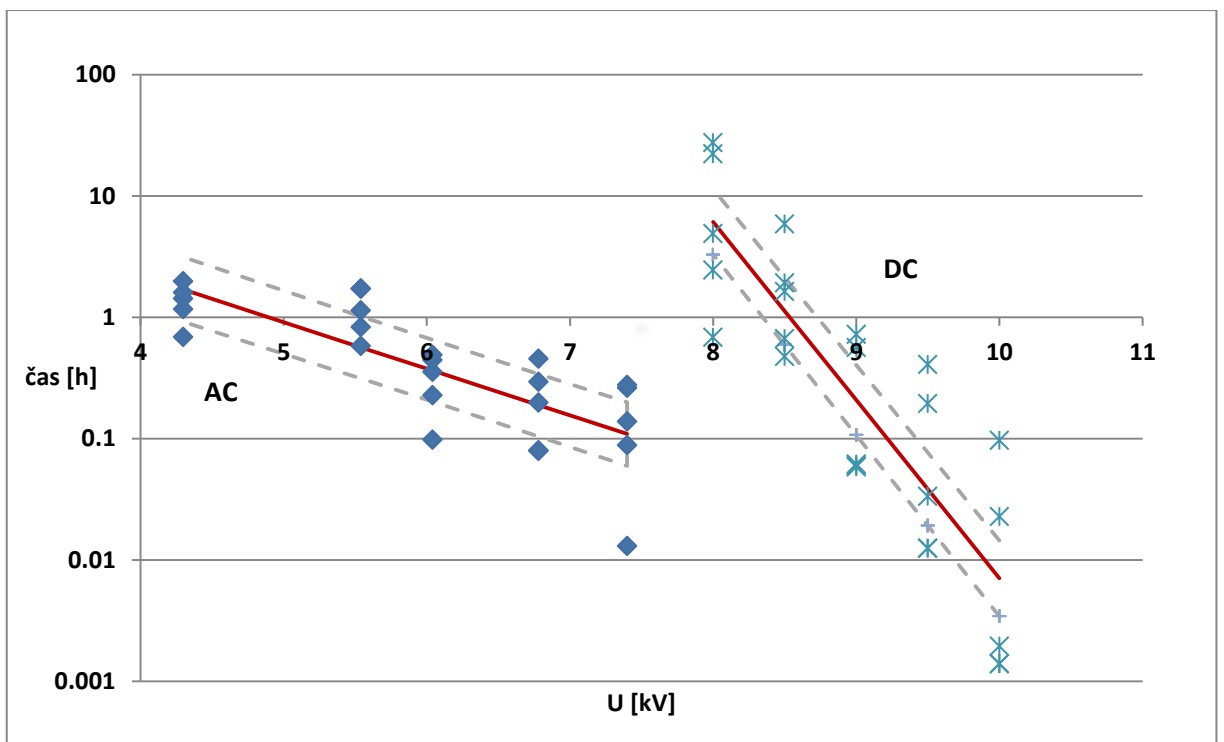
U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]
15	0.012	14.5	0.083	14	0.141	13	0.700	12	1.150
15	0.101	14.5	0.122	14	0.150	13	0.758	12	1.366
15	0.108	14.5	0.166	14	0.245	13	0.850	12	1.783
15	0.185	14.5	0.370	14	0.320	13	0.895	12	1.816
15	0.209	14.5	0.444	14	0.800	13	1.950	12	2.766

Tab. 4 – hodnoty měření řepkového oleje při DC namáhání

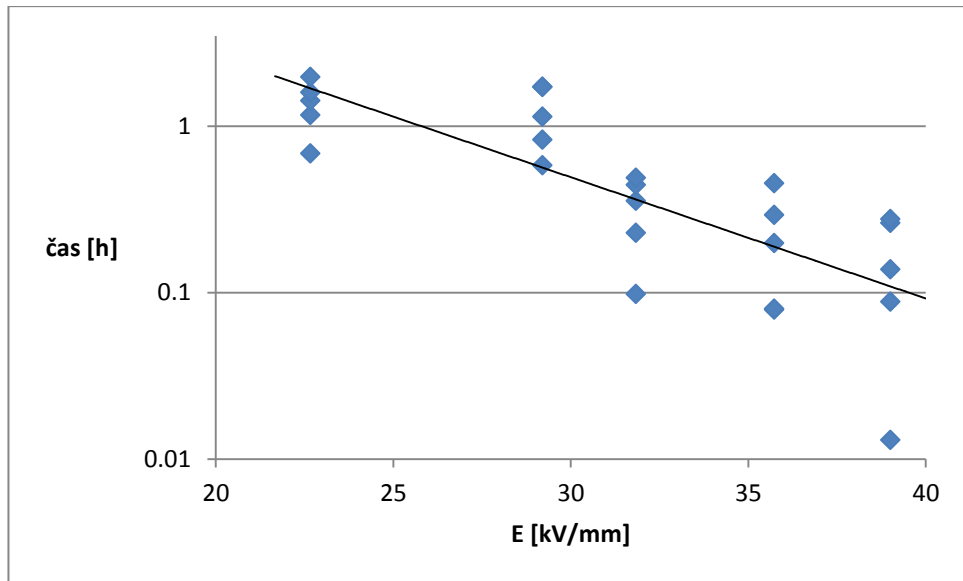
U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]	U [kV]	t [hod]
10	0.00139	9.5	0.01	9	0.06	8.5	0.48	8	0.683
10	0.00139	9.5	0.01	9	0.06	8.5	0.67	8	2.45
10	0.00194	9.5	0.03	9	0.06	8.5	1.63	8	4.88
10	0.02278	9.5	0.19	9	0.56	8.5	1.92	8	22.21
10	0.09639	9.5	0.41	9	0.72	8.5	5.87	8	27.44



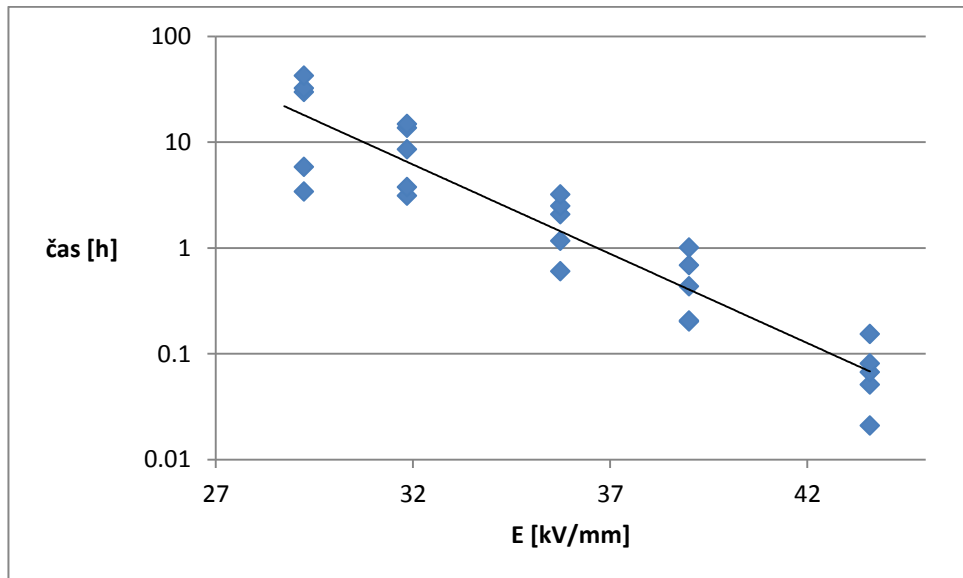
Graf 1 – křivka odolnosti slunečnicového oleje pro AC a DC namáhání



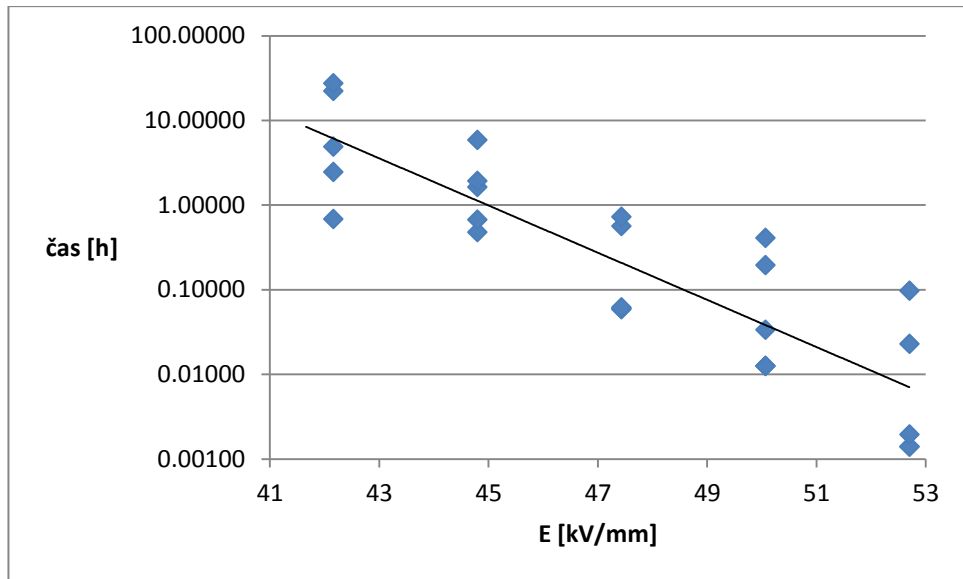
Graf 2 – křivka odolnosti řepkového oleje pro AC a DC namáhání



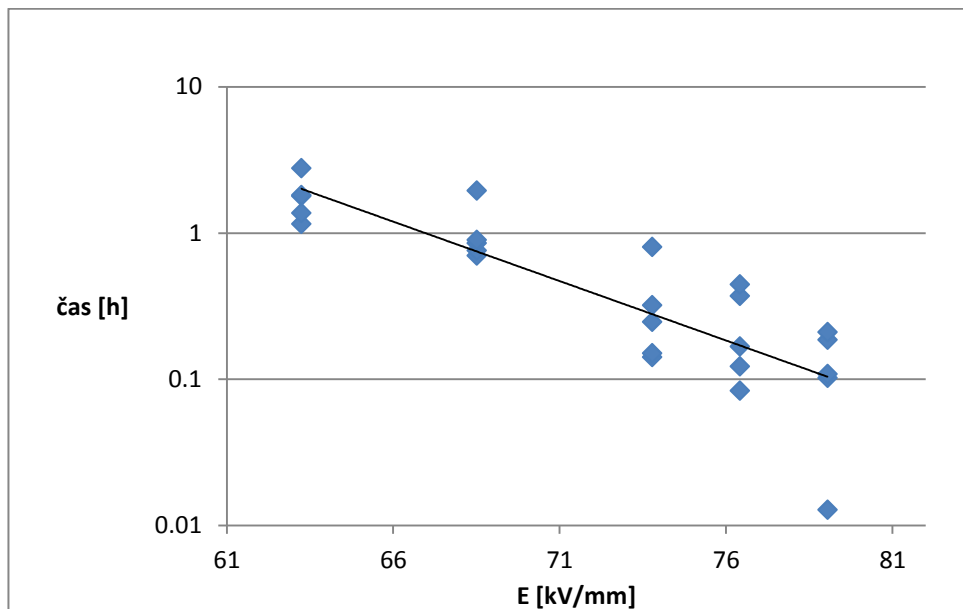
Graf 3 – křivka odolnosti řepkového oleje pro AC namáhání



Graf 4 – křivka odolnosti slunečnicového oleje pro AC namáhání



Graf 5 – křivka odolnosti řepkového oleje pro DC namáhání



Graf 6 – křivka odolnosti slunečnicového oleje pro DC namáhání