

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektrická pevnost kapalných izolantů jako diagnostický  
parametr

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin KOKOŠKA**  
Osobní číslo: **E12B0108P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Elektrická pevnost kapalných izolantů jako diagnostický parametr**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte rozdělení kapalných izolantů a popište jejich využití v elektrotechnice.
2. Analyzujte současné trendy v oblasti kapalných izolantů.
3. Popište teorie přeskoků kapalných izolantů.
4. U vybraných zástupců kapalných izolantů proveďte zkoušku elektrické pevnosti a výsledky porovnejte.



*[Handwritten signature]*

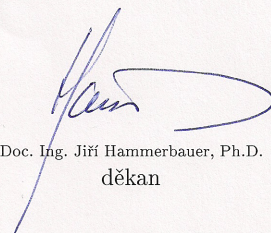
V Plzni dne 15. října 2015

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

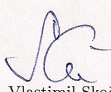
1. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. Mentlík, V. et al. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. Balygin I.E. Electric Strength of Liquid Dielectric. Foreign Technology Division Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1972.
4. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore apod.).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Hornak**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## Abstrakt

Práce se zabývá problematikou kapalných izolantů. Jejím cílem je rozebrat jejich vlastnosti a porovnat je z hlediska odolnosti vůči elektrickému přeskoku formou napěťových zkoušek. Úvod charakterizuje činitele, jenž ovlivňují chování kapalin při vystavení intenzitě elektrického pole a definují rozdíly jednotlivých druhů transformátorových olejů. Pro bližší pochopení jevů spojených se samotným přeskokem jsou zde popsány základní hypotézy z oblasti teorie přeskoků. Důraz je kladen na shrnutí směrů, které se pokoušejí zlepšit efektivitu izolačních kapalin a zmírnit dopad na životní prostředí. Velký potenciál v tomto ohledu představují nové technologie aplikované na izolační média transformátorů, které jsou zde popsány. Naměřené hodnoty v závěru práce potvrzují dvě hypotézy. Za prvé, degradační činitele mají významný vliv na elektrickou pevnost kapalných izolantů. Za druhé, přírodní estery dosahují v rámci hodnot průrazných napětí podobných výsledků jako minerální oleje.

## Klíčová slova

olej, transformátor, dielektrikum, elektrický přeskok, náboj, elektrické napětí, intenzita elektrického pole

## Abstract

This thesis concerns the problematic of liquid insulators. The aim of the paper is to analyze its properties and compare the liquids in terms of resistance to electrical flashover by executing the tests of electric strength. The factors that affects behavior of liquids and defines differences between individual transformer oils have been characterized in the beginning. For deeper understanding of phenomena related to voltage breakdown, the general hypotheses have been also described. The emphasis is given on summarizing ways that try to improve the effectiveness of liquid insulators and reduce their impact on the environment. New technologies applied to the insulating media, which have been also discussed, uncovers a lot of potential in this matter. Experimental part of the thesis is based on measurement of new and aged oil samples. Collected data proves two hypotheses. Firstly, the degradation factors described in this paper hihgly affect the electric strength of liquid insulators and secondly, natural esters have similar properties in terms of breakdown voltage as mineral oils.

## Key words

oil, transformer, dielectric, electrical flashover, electric charge, voltage, electric field intensity

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 30.5.2016

Martin Kokoška

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Hornakovi za cenné rady, benevolenci a metodické vedení práce.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Kapaln� izolanty</b>	<b>11</b>
1.1 Základní vlastnosti kapalných dielektrik . . . . .	11
1.2 Transform�torov� oleje . . . . .	14
1.2.1 Minerální oleje . . . . .	14
1.2.2 Syntetick� oleje . . . . .	15
1.2.3 Rostlinn� oleje . . . . .	17
<b>2 Analýza současných trendů</b>	<b>20</b>
2.1 Modifikace minerálních olejů . . . . .	20
2.1.1 Nanokapaliny . . . . .	21
2.1.2 Inteligentní kapaliny . . . . .	23
2.2 Aditiva . . . . .	24
2.3 Možnosti rostlinných olejů . . . . .	24
<b>3 Teorie přeskoku</b>	<b>26</b>
3.1 Elektrick� pevnost . . . . .	26
3.2 Technicky �ist� kapaln� izolanty . . . . .	29
3.3 Základní hypotézy přeskoku . . . . .	33
<b>4 Měření elektrick� pevnosti</b>	<b>35</b>
4.1 Popis nap�e�ov� zkoušky . . . . .	35
4.2 Popis měření . . . . .	36
4.3 Vyhodnocení statistických ukazatelů . . . . .	39
4.4 Diskuze výsledků měření . . . . .	44
<b>5 Závěr</b>	<b>45</b>
<b>Reference</b>	<b>46</b>



## Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
$d$	nejmenší vzdálenost mezi elektrodami
$E_p$	elektrická pevnost
$I_c$	jalový proud
$I_w$	činný proud
$n$	počet měření
$tg\delta$	ztrátový činitel
$U_p$	přeskokové napětí
$\bar{U}_p$	aritmetický průměr hodnot přeskokového napětí
$\tilde{U}_p$	medián hodnot přeskokového napětí
$U_x$	naměřená hodnota přeskokového napětí
$v$	variační koeficient hodnot přeskokového napětí
$\gamma$	konduktivita
$\varepsilon_r$	relativní permitivita
$\rho_v$	rezistivita
$\sigma$	směrodatná odchylka hodnot přeskokového napětí
$\sigma^2$	rozptyl hodnot přeskokového napětí

## Úvod

Mezi nejčastější použití izolačních kapalin patří v dnešní době bezesporu oblast transformátorů vysokého napětí. Izolace vysokonapěťových vinutí je velmi důležitá a to nejen z hlediska elektrické izolace, ale především odvodu tepla ze zařízení. Příkladů selhání či porušení izolace je v praxi celá řada. V takových případech dochází k obrovským škodám a riziku těžkých poranění přítomných pracovníků, nehledě na energetické ztráty při poruše. Proto je důležité se touto oblastí elektrotechniky zabývat a snažit se vylepšovat technologii distribuce elektrické energie. Do tohoto problému jednoznačně spadá i otázka izolačních kapalin. Práce popisuje metody a směry, které jsou perspektivní a mohou mimo jiné přinést lepší izolační vlastnosti, dokonalejší odvod nežádoucího tepla nebo například ekologičtější likvidaci použitých olejů.

# 1 Kapalné izolanty

Izolační kapaliny jsou obecně látky, které zamezují průchodu elektrického proudu a izolují tak vinutí v rámci tzv. systému olej-papír [1]. Z toho vyplývá nutná synergie mezi tuhou složkou - papírem a kapalnou složkou - olejem. Izolačních olejů pro transformátorové použití je v dnešní době velké množství. Liší se svými vlastnostmi, mezi které patří zejména hodnoty průrazného napětí, rezistivity, permitivity, ztrátového činitele a další [1].

Nejvýznamnějším trendem dnešní doby je především snaha nahradit minerální oleje kapalinami, které by nepředstavovali takovou zátěž pro životní prostředí. Vzhledem k tomu, že oleje na ropné bázi jsou toxické, je zde přetrvávající problém ohledně jejich ekologické likvidace. Proto se dnešní výzkumy zaměřují na zlepšení vlastností izolačních kapalin na syntetické a především rostlinné bázi. Tuto skutečnost dokazuje mnoho vědeckých prací z posledních let, např. [2], [3].

## 1.1 Základní vlastnosti kapalných dielektrik

Pro přesné pochopení odlišností jednotlivých izolantů a stanovení možností jejich použití je nejdříve třeba popsat jednotlivé vlastnosti, které jsou pro efektivní izolaci provozovaného zařízení nezbytné. S ohledem na rozsah práce uvedu pouze nejvýznamnější z hlediska řešené problematiky.

### Rezistivita

Základní vlastnost elektrotechnických materiálů, která představuje schopnost klást odpor průchodu elektrického proudu. Elektrický proud se látkou šíří v podobě iontů, které představují volné nosiče náboje. Čím více těchto volných nosičů látka obsahuje, tím větší je její konduktivita neboli vodivost vztažená na jednotku délky [4]. Rezistivitu je možné vyjádřit jako převrácenou hodnotu konduktivity.

U elektrotechnických olejů chceme dosáhnout co největší rezistivity, aby mohli plnit funkci izolantu. Většina olejů, ať už se jedná o látky rostlinného, syntetického nebo minerálního původu, podmínky vysoké rezistivity splňují. Poněkud horší výsledky mohou

být u rostlinných olejů, vzhledem k problémům s odstraňováním vázané vody. Např. hodnota rezistivity minerálního oleje, který je dnes stále nejrozšířenější, bývá dle [5]  $\rho_v = 10^{12} \div 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ .

## Relativní permitivita

Další z vlastností závislých na použitém materiálu, či látkovém prostředí. Popisuje schopnost materiálu polarizovat se v elektrostatickém poli. Tato veličina je vztažená na permitivitu vakua a definuje, kolikrát je intenzita elektrického pole v použitém dielektriku menší než ve vakuu [6]. Vlivem polarizace dielektrika dochází k vytvoření dipólů uvnitř materiálu, které mají schopnost působit zpět vlastním elektrickým polem proti příčině svého vzniku, tedy vnějšímu elektrickému poli [5]. Relativní permitivita je klíčová pro charakterizaci dielektrika ve smyslu schopnosti odolávat elektrickému průrazu. Veličinu značíme  $\epsilon_r [F \cdot \text{m}^{-1}]$ .

## Ztrátový činitel

Pokud připojíme dielektrický prvek nebo systém ke zdroji periodicky proměnného napětí, musí se periodicky měnit i vnitřní elektrické pole [7]. Toho je v souladu s principem polarizace dielektrika docíleno pohybem elementárních částic uvnitř materiálu. Tento proces nemůže být s ohledem na fyzikální zákony bezztrátový. Přítomností činného proudu vznikají energetické ztráty, jejichž velikost závisí na typu polarizace použitého dielektrika. U některých typů jsou ztráty zanedbatelné (elektronová polarizace), avšak v některých případech mohou být značné (relaxační polarizace) [5]. Ztrátový činitel lze vyjádřit dle [7], jako poměr činného a jalového výkonu:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_w}{I_c} \quad [-] \quad (1)$$

kde  $I_w$  je činný proud a  $I_c$  jalový proud.

## **Elektrická vodivost**

Jde o fyzikální veličinu, která popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Konkrétně udává velikost elektrického proudu, který prochází daným materiálem při jednotkovém napětí na jeho koncích [5],[8],[9].

Při popisu materiálu v elektrotechnice jsou podle [5] pro elektrickou vodivost zavedeny veličiny: měrná elektrická vodivost (konduktivita)  $\gamma$  [ $S \cdot m^{-1}$ ] a měrný elektrický odpor (rezistivita)  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]. Přičemž platí, že měrnou elektrickou vodivost lze podle [5], vyjádřit jako převrácenou hodnotu měrného elektrického odporu a naopak:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [S \cdot m] \quad (2)$$

Podle způsobu přenášení elektrického náboje můžeme elektrickou vodivost rozdělit na elektronovou, iontovou, děrovou, protonovou a elektroforetickou. U většiny je elektrický náboj přenášen prostřednictvím elementárních částic nebo iontů. Elektroforetická vodivost je charakteristická přenosem prostřednictvím skupiny částic [5], [9].

U kapalin ovlivňuje výslednou vodivost řada faktorů. Především složení, struktura, příměsi a nečistoty, jevy spojené s vnitřním uspořádáním molekul. Pro účely zkoumání elektrické vodivosti se využívají extrémně čisté izolanty a technicky čisté izolanty [5], [9].

Uvedené vlastnosti jsou pouze základem pro posouzení izolačního materiálu. Vlastností, podle kterých lze izolaci posuzovat je mnoho, avšak pro tuto práci je nejdůležitější elektrická pevnost, jenž je teoreticky popsána v kapitole 3. *Teorie přeskočků*.

## 1.2 Transformátorové oleje

Problematika transformátorových olejů je stálou otázkou v oblasti elektroizolačních systémů. Mnoho laboratoří po celém světě se snaží vyvíjet stále nové kapaliny pro další zlepšování vlastností, např. [1], [2], [3]. Ačkoliv tato snaha přinesla za poslední desetiletí již mnohé pokroky, stále jsou nejrozšířenějším typem elektroizolačního oleje na ropné bázi. Tyto oleje po příslušných úpravách dosahují velmi dobrých vlastností. Nejsou ovšem díky své toxicitě příliš šetrné k životnímu prostředí. I přes tento nedostatek stále dominují. V dnešní době existují syntetické oleje, které dosahují konkurenceschopných vlastností. Nicméně náklady na jejich výrobu jsou značně vyšší. Díky tomu se dnešní vědecká centra snaží najít řešení v izolačních kapalinách získaných z rostlinných zdrojů. Momentálně se rostlinné oleje používají pro nízkonapěťové aplikace. Pro vysoká napětí se téměř nevyužívají nebo na velmi krátké doby. Velkou nevýhodou látek na rostlinné bázi je jejich snaha vázat na své molekuly značné množství vody. Této vody se těžko zbavuje. Jendou z možností je zahřát látku na vyšší teplotu (100 °C) a poté ji nechat rozprášit v prostoru s nízkým tlakem (10 mBar) [1]. Podíl vlhkosti je tak možné významně zredukovat, ale zdaleka ne odstranit.

### 1.2.1 Minerální oleje

Jedná se o nejpoužívanější elektroizolační oleje v dnešní době. Jsou získávány destilačním procesem z ropy s následnou rafinací. Obecně jsou minerální oleje směsí uhlovodíků komplikovaného chemického složení. Ropa není pouze kapalná sloučenina. Podle [1] obsahuje množství dalších látek a to jak tuhých, tak plyných. Z velké části je tvořena uhlovodíky (97 %), dále sloučeninami síry, kyslíku, dusíku. Obsahuje též kovy v podobě organických a anorganických solí. Z tuhých látek především parafin. Z rozpuštěných plyných látek jsou to oxid uhličitý, ethan, butan, dusík a některé vzácné plyny. Konkrétní složení závisí mimo jiné i na původu ropy.

Díky svým dobrým vlastnostem, široké dostupnosti a nízké ceně jsou minerální oleje nejvíce rozšířené v oblasti vysokonapěťových transformátorů. Díky dlouholetým zkušenostem s těmito kapalinami, je dnes snazší odhalit případné problémy plynoucí z jejich použití. Používané oleje by měli být v souladu s příslušnou normou, konkrétně IEC 60296. Pro údržbu provozovaných transformátorů slouží standard IEC 60422 [11].

Podle [5] můžeme dělit minerální oleje do dvou základních kategorií, a to na parafinické a naftanické. Rozdělení vychází z druhu použité ropné suroviny a podle množství obsahu daného typu uhlovodíku. Parafinické oleje jsou nasycené uhlovodíky. Mohou mít jak rozvětvené (izoalkany, izoparafiny), tak lineární řetězce (n-alkany, parafiny). Lze je popsat obecným vzorcem  $C_nH_{2n+2}$ . Vlastností transformátorových olejů je poměrně vysoký bod vzplanutí [1]. Při teplotách blízkých nule mají tendenci tuhnout, avšak při vyšších teplotách je viskozita dobrá a z chemického hlediska jsou stále [1].

Konečné vlastnosti se mohou u konkrétních olejů lišit, ale pro představu lze uvést alespoň obecně předpokládané vlastnosti podle [5]:

- elektrická pevnost - 60 až 70 kV/2,5 mm,
- rezistivita -  $\rho_V = 10^{12} \div 10^{14} \Omega \cdot m$ ,
- relativní permitivita -  $\epsilon_r = 2,1 \div 2,4$ ,
- ztrátový činitel -  $\text{tg } \delta = 0,001$ ,
- bod vzplanutí - 130 až 150 °C.

### 1.2.2 Syntetické oleje

Syntetické oleje vznikají různými způsoby a je jich dnes velké množství. Uvedené typy představují základní rozdělení a charakteristické vlastnosti podle [1], [5], [10], [11]:

- Chlorované uhlovodíky - deriváty benzenu a difenylu. Lze vytvořit nahrazením atomu vodíku atomem chloru v molekule uhlovodíku. Elektroizolační vlastnosti lze ovlivňovat stupněm chlorování. Mezi jejich vlastnosti patří nehořlavost a nevířivost. Dříve byly hojně používány, dokud se neprokázali významné škodlivé účinky na lidské zdraví a životní prostředí.
- Polybutyleny - vznikají polymerací nenasycených uhlovodíků. Jsou směsí polymerů butenu a představují nepolární dielektrika. Vykazují nejen vynikající elektroizolační vlastnosti, ale také stabilitu i při vyšších teplotách. Jsou odolné vůči

oxidaci a záření. Nejčastěji se používají k impregnaci svitkových kondenzátorů a nebo jako izolační kapalina pro kabely, což je po transformátorech také časté využití elektroizolačních kapalin.

- Fluorované sloučeniny - jde o deriváty uhlovodíků, aminů a esterů, přičemž atomy vodíku jsou v tomto případě nahrazeny fluorem. Ačkoliv vykazují dobré elektroizolační vlastnosti a jsou teplotně stabilní do teplot okolo 500 °C, mohou za určitých podmínek (elektricky výboj, vlhkost) vytvářet kyseliny s obsahem fluoru, což ohrožuje izolační systém a kovy. Toxicita fluoru také může představovat problém, ale až při velmi vysokých teplotách, kdy se fluorované kapaliny snadno vypařují. Hlavní využití nacházejí v oblasti transformátorů a výkonových spínačů, kde se uplatňují jejich zhášecí účinky.
- Silikonové kapaliny - organokřemičité makromolekulární sloučeniny, jenž obsahují organický radikál; nejčastěji v podobě ethylové, methylové nebo fenylové skupiny. Velkou předností jsou vynikající elektroizolační vlastnosti, nehořlavost a teplotní stabilita ve velkém rozsahu teplot. Na rozdíl od minerálních olejů nepodléhají oxidaci a mají nízký bod tuhnutí. Nemají nepříznivý dopad na člověk ani životní prostředí a nepůsobí agresivně ani na ostatní běžně používané izolační materiály.
- Organické estery - vyrábějí se pomocí chemické syntézy. Jsou charakteristické nízkou hodnotou ztrátového činitele, čehož se využívá především u kondenzátorů při vysokých frekvencích. Dále také vysokým bodem vzplanutí. Dnes se používají běžně i pro transformátory jako náhrada minerálních olejů; na našem trhu nejčastěji pod označením MIDEL 7131 a ARAL 4569. Oproti kapalinám na ropné bázi trpí větší viskozitou, což zhoršuje odvod tepla a cirkulaci oleje. S tím je třeba počítat při projektování transformátoru.

Další možnost představují ještě syntetické kapaliny na přírodní bázi. Ty se snaží řešit otázku nestabilních vlastností některých rostlinných olejů. Cílem pokusů je především zvýšit termicko-oxidační stabilitu [1]. Oleje tohoto typu se zatím stále zkoumají a v praktických aplikacích se zatím příliš nevyužívají.



### 1.2.3 Rostlinné oleje

Oleje na rostlinné bázi se získávají lisováním semen rostlin nebo také prostřednictvím tepelné extrakce s následnou rafinací [11]. Jedná se o směsi glycerinů esterů a nenasycených mastných kyselin, přičemž tyto látky dělíme na oleje vysychavé a nevysychavé [1].

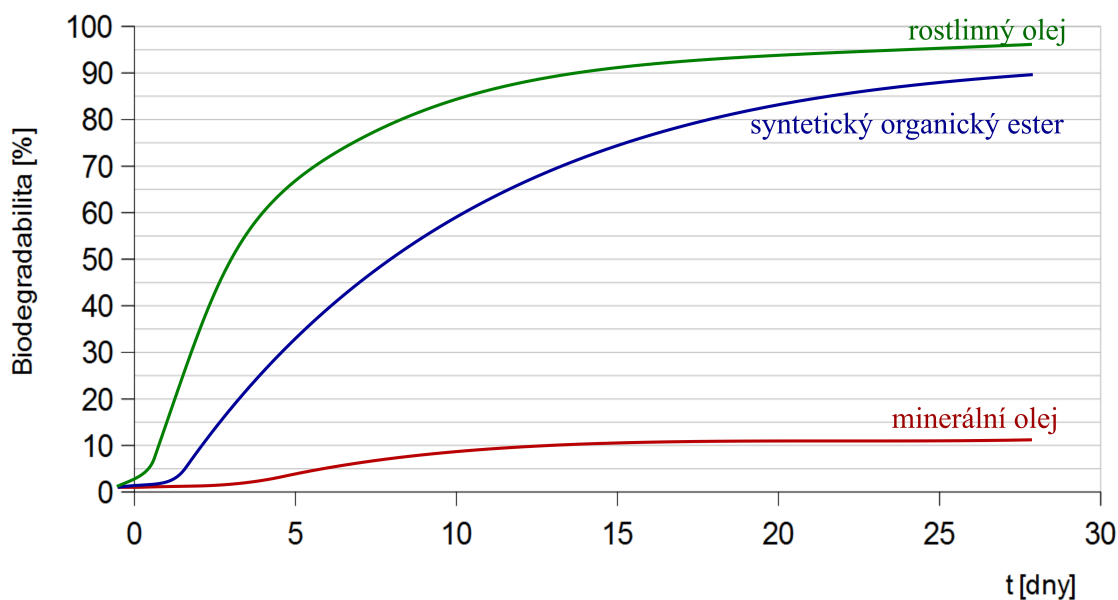
Vysychavé oleje nacházejí uplatnění při výrobě elektroizolačních laků a nátěrů. Jsou charakteristické svou schopností vytvrdit se, k čemuž dochází jako následek chemické reakce se vzduchem za přítomnosti tepla a světla. Výsledkem je tvrdá vrstva s dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Tuto schopnost je propůjčuje přítomnost nenasycených mastných kyselin [1]. Hlavními zástupci jsou lněný a dřevný olej. Zejména dřevný olej vykazuje dobrou odolnost vůči vlhkosti a plísní. Nevýhodou je ovšem tepelné stárnutí, které může způsobit praskání, či dokonce odlupování nanesené vrstvy. Dnešním trendem je nahrazovat tyto oleje syntetickými pryskyřicemi [11]. Tyto procesy je možné ovlivňovat a urychlit zvyšováním teploty, intenzivnější expozicí nebo použitím katalyzátoru [1].

Hlavním zástupcem nevysychavých olejů je ricinový olej. Představuje polární dielektrikum s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 4,2 \div 4,6$ . Je odolný vůči plynům a částečným výbojům [10]. Své uplatnění nachází ve stejnosměrných obvodech, kde se používá jako náplň pro kondenzátory [1].

V případě použití těchto olejů pro účely izolace transformátorových vinutí je patrná řada problémů. Díky špatné oxidační stabilitě je významně ovlivněna synergie mezi kapalinou a transformátorovou lepenkou (papírem) [1], [12]. Je nutné si uvědomit, že konečná životnost většiny transformátorů není dána izolační kapalinou jako takovou, ale právě stavem papírové izolace. Ta je narušována především chemickými vlivy spojenými s parametry izolační kapaliny. Špatná oxidační stabilita a vyšší kyselost těchto prostředí není pro životnost papírové izolace prospěšná [12]. Z tohoto důvodu lze předpokládat nižší životnost transformátorů plněných rostlinnými oleji. To je jeden z nedostatků, díky kterým se rostlinné oleje zatím příliš neosvědčili jako náplň vysokonapěťových transformátorů. Problém může představovat i vyšší viskozita přírodních esterů. Ta je velmi důležitým parametrem izolačního oleje, protože má přímý vliv

na cirkulaci oleje v transformátoru. S větší viskozitou rostou i nároky na celý systém, zejména pak čerpadla. Mimo jiné způsobuje i zvýšení hmotnosti celého systému [1], [12]. Mezi další charakteristické rysy patří i tuhnutí již při teplotách lehce pod bodem mrazu. To je problém zejména při provozu v chladných podmínkách a při údržbě [13]. Z dalších drobnějších (řešitelných) nedostatků uvedu např. horší ztrátový činitel [13], [14]. Zkráceně řečeno, čím větší jsou dielektrické ztráty, tím více tepla musí olej odvádět. Tento nedostatek jde ruku v ruce s problémem vyšší viskozity. Ztrátový činitel se zde dá do jisté míry řešit např. rafinací, kdy se z oleje odstraňují nežádoucí látky [15].

Dnes se transformátory s těmito oleji objevují zejména na přímořských oblastech, kde jsou ceněny pro svojí vynikající biodegradabilitu [13]. Schopnost biologického rozkladu je u olejů stále důležitější, zejména pak při poruše [1], [16]. Na obr. 1 je možné vidět srovnání doby a míry rozkladu rostlinných olejů v porovnání s ostatními druhy. Je naprosto zřejmé, proč je dnes velká snaha u těchto olejů využít jejich maximální potenciál. Tento obecný graf je inspirován skutečnými hodnotami získaných z [14].



Obrázek 1: Srovnání schopnosti rozkladu jednotlivých druhů olejů [14]

Hlavní výhodou těchto olejů je jejich vysoká biodegradabilita, díky které se snažíme najít pro tyto kapaliny širší využití. Nevýhodami jsou např. vyšší viskozita nebo špatná oxidační stabilita [1], [16]. Rostlinné oleje jsou jakožto přírodní organické látky poněkud nevyzpytatelné. Záleží totiž nejen na použité plodině, ale také na konkrétní úrodě, tedy místě a podmínkách pěstování.

## 2 Analýza současných trendů

Nové výzkumy a snaha vytvářet dokonalejší a efektivnější izolační kapaliny vyplývá především z tlaku ekologických a ekonomických požadavků. Dnes stále kapaliny na bázi ropných uhlovodíků nemají vhodnější alternativu, což významně ovlivňuje životní prostředí. Nicméně tato skutečnost nasměrovalo světové vědecké laboratoře novým směrem. Největším centrem pozornosti se staly syntetické kapaliny, u kterých bylo možné pozorovat obrovský skok kupředu. Elektroizolační vlastnosti těchto látek, jejich životnost a stabilita se výrazně zlepšily, stejně tak byly odstraněny problémy s toxicitou, špatnou biologickou odbouratelností. Jeden problém ovšem zůstává a to značné náklady na výrobu. V tomto směru jsou syntetické kapaliny nevhodné pro masové využití v průmyslu, ačkoliv své uplatnění ve speciálních a náročných aplikacích již nějakou dobu mají [17]. Nové směry současné doby hledají řešení v rostlinných olejích. Důvody jsou zřejmé. Tyto látky jsou dostupné ve velkém množství. Jejich základní zpracování není finančně náročné. Ovšem zajistit kvalitní elektroizolační vlastnosti, rozumnou dobu stárnutí, teplotní i chemickou stabilitu atd., bude předmětem bádání a zdokonalování ještě dlouhá léta, pokud budeme chtít zároveň udržet jejich příznivou cenu.

### 2.1 Modifikace minerálních olejů

Ačkoliv by bylo dobré nahradit minerální oleje alternativou v podobě přírodních esterů, není to možné okamžitě. Minerální oleje svými vlastnostmi a možnostmi použití stále dominují. Z tohoto důvodu jsou také stále zkoumány a vyvíjeny.

Modifikací minerálního oleje, tedy přidáním jiné látky, je možné významně ovlivnit jeho vlastnosti, zejména pak elektrickou pevnost, schopnost odvádět teplo nebo oxidační procesy [18], [19]. Vzhledem ke složitosti a jen těžké předvídatelnosti média je třeba výzkumy vést experimentálně. Je nezbytné zjistit, jak se výsledná látka chová v různých podmínkách a jak reaguje na změny různých faktorů, jako např. teplota, tlak, charakter napětí, stáří kapaliny, chemická stabilita atd. Pro účely zkoumání elektrické pevnosti se většinou provádí měření jak nových, tak zestárlých olejů, přičemž doba a teplota pro umělé stárnutí se může lišit podle potřeby měření nebo použitých vzorků [18], [19], [20].

### 2.1.1 Nanokapaliny

V dnešní době je již k dispozici velké množství vědeckých prací zabývajících se touto tematikou, což vedlo k objevu hned několika důležitých sloučenin. Mimo jiné mezi významné patří např. titan v podobě oxidu titaničitého  $TiO_2$ , oxid železatoželezitý  $Fe_3O_4$ , oxid hlinitý  $Al_2O_3$ . Dalších zkoumaných látek existuje mnoho. Liší se vlastnostmi a to někdy i velmi výrazně. Např.  $TiO_2$  lze charakterizovat jako polovodičový materiál, zatímco  $Fe_3O_4$  materiál vodivý. Teoretické principy popisující chování na úrovni elementárních částic nebyly doposud uspokojivě vysvětleny. Je tomu tak zejména proto, že tato technologie je v praxi poměrně mladá. Do transformátorových olejů se zatím přidávali spíše inhibitory, které plní odlišnou funkci, než je přímé zlepšení elektroizolačních vlastností a soustředí se spíše na problematiku stárnutí a oxidační procesy.

Jednou z prvních látek se kterou se začalo v této oblasti experimentovat byl oxid titaničitý [22]. Bylo zjištěno, že přidáním polovodičového materiálu do minerálního oleje výrazně zlepšilo jeho elektrickou pevnost při použití střídavého napětí. Má se za to, že disperzí vhodného množství konkrétní látky v oleji má za následek vytvoření překážek, které brání volným nosičům v průchodu. Nosiče jsou vlivem nanočástic v elektrickém poli zachytávány, čímž ztrácí energii a rychlost [19], [22], [23]. Takovým snížením mobility volných nosičů je možné významně zvýšit elektrickou pevnost celého systému. Zároveň bylo použitím různých množství  $TiO_2$  zjištěno, že při vyšších koncentracích dochází naopak k poklesu přeskokového napětí. To je způsobeno větší pravděpodobnosti shlukování částic [22], [24].

#### Oxid titaničitý

Jak už bylo řečeno oxid titaničitý se v izolační kapalině chová jako polovodič. Při použití této látky dochází ke snížení hodnoty rezistivity, což je sice nežádoucí, ale získáme tím celkové zvýšení hodnoty elektrické pevnosti. Ta je zvýšena vlivem přítomných nanočástic na volné nosiče náboje za přítomnosti elektrického pole [19]. Obsah částic v kapalině bývá poměrně malý; okolo 0,075 % celkového objemu, přičemž průměr nanočástic je menší než 20nm [18]. V některých případech je možné dosáhnout zvýšení hodnoty elektrické pevnosti až o 20%. V praxi se počítá spíše s hodnotami 10 ÷ 15%

[18], [22], [23]. Přidáním nanočástic se také prodlužuje maximální doba vystavení účinkům elektrického pole přibližně o 1,5 násobek [18]. Tyto výsledky se nicméně týkají měření za použití střídavého napětí. Při stejnosměrném napětí je hodnota elektrické pevnosti velmi ovlivněna polaritou napětí, z čehož vyplývají i omezení použití těchto nanokapalin [19].

Má se za to, že polovodivé částice  $TiO_2$  obsažené v kapalině, jsou schopny konvertovat rychlé elektrony na pomalé záporně nabitě částice. Tento proces způsobí pokles potenciálu podél přeskového kanálu [18] [19], [20]. Jedná se však spíše o hypotézu, jelikož jevy spojené s použitím nanočástic jsou stále předmětem bádání a informace je třeba získávat experimentálně.

### Oxid železnato-železitý

Známi spíše pod názvem magnetit, oxid železnato-železitý představuje vodivou látku, která se v oblasti izolačních kapalin osvědčila. Zlepšovat elektroizolační vlastnosti použitím vodiče, tedy materiálu, který má velký obsah volných elektronů, může být matoucí. Magnetit skutečně zvyšuje konduktivitu, protože se jedná o vodivou látku, zároveň však zvyšuje odolnost vůči přeskoku ovlivněním průchodu volných nosičů kapalinou podobně jako  $TiO_2$  [21].

Výzkumem magnetických kapalin se ukázalo, že dispergovatelnost těchto částic v oleji je velmi závislá na orientaci vnějšího magnetického pole. V magnetickém poli tedy dochází k agregaci částic do podoby můstku, což může negativně ovlivnit hodnotu průrazného napětí [19], [25]. Přesto jsou tyto nanočástice vhodné pro celkové zvýšení elektrické pevnosti, protože jsou schopny zachytit rychlé elektrony nutné k vytvoření přeskového výboje. Tyto částice jsou podobně jako u polovodičových nanočástic konvertovány na pomalé negativně nabitě částice. To je možné díky velmi krátké relaxační době vodivých materiálů, která je podstatně kratší než čas potřebný ke zformování přeskového kanálu. U polovodičových materiálů je tato doba delší a u izolantů velmi dlouhá [19], [22].

V případě nanokapalin se výzkumy nezaměřují pouze na zvýšení elektrické pevnosti, ale také na rozvod tepla a zlepšení cirkulace oleje. I v této oblasti byly zjištěny významná zlepšení. V případě magnetických kapalin, můžeme pozorovat lepší odvod tepla, který je způsoben vlivem magnetického pole na částice  $Fe_3O_4$  [25] [26], [27].

Výše popsané látky podle prozkoumaných zdrojů představují nejčastěji používané nanočástice pro úpravu transformátorových olejů. Ve vědeckých publikacích je možné najít další kapaliny, jejichž vlastnosti se z hlediska elektrické pevnosti více či méně liší. Některé se zkoumají především z hlediska lepšího odvodu tepla, které způsobuje značnou degradaci izolačního systému a velmi urychluje stárnutí použitých kapalin. Takovou nanokapalinou je například modifikovaný olej s dispergovanými nanočásticemi oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ , tzv. aluminy [28]. Experimentuje se také např. s diamantovými částicemi, které jsou schopny zvýšit elektrickou pevnost a prodloužit životnost kapaliny [29].

### **2.1.2 Inteligentní kapaliny**

Tento termín se začal v posledních letech objevovat častěji. I v tomto případě se jedná o princip založený na modifikaci kapaliny přidáním částic jiné látky. Jde ovšem o myšlenku řídit vlastnosti kapaliny v provozu pomocí signálu. V praxi by taková kapalina reagovala na přiložené elektrické nebo magnetické pole a měnila své vlastnosti v provozu. Uvažuje se, že by taková technologie mohla snížit dielektrické ztráty [13], [30]. Podle [13] je možné tyto kapaliny rozdělit na dva základní typy:

- Elektoreologické kapaliny - obsahují polovodičové částice s vhodnými dielektrickými vlastnostmi suspendované v izolační kapalině.
- Magnetoreologické kapaliny - obsahují částice schopné magnetizace suspendované v izolační kapalině.

## 2.2 Aditiva

Aditiva používaná pro účely elektroizolačních olejů se vyvíjejí již poměrně dlouhou dobu. Slouží především k posílení fyzikálně-chemických a dielektrických vlastností. Využívá se velké množství chemických látek, které mohou sloužit např. jako inhibitory, látky na zvýšení dielektrické pevnosti nebo látky zabraňující tuhnutí při nízkých teplotách. Mohou pomoci kapalině získat oxidační stabilitu, schopnost lépe absorbovat plyny nebo odolávat částečným výbojům. Většinou jsou látky přidávány již během výrobního procesu, ale je možné je použít i při údržbě transformátoru [13].

Nejznámější jsou fenolické antioxidanty 2,6-di-terc-butyl-p-kresol a 2,6-di-terc-butylfenol [13]. Množství těchto látek v oleji je definováno příslušnými normami; konkrétně mezinárodní standardy ASTM D3487 a IEC 60296 [31], [32]. Řádově se jedná o setiny až desetiny procent celkového objemu. Díky zvýšené odolnosti vůči oxidaci a dalším vlivům získá izolační systém delší životnost.

V nedávné době bylo pozorováno několik selhání transformátorů, které způsobil sulfid mědi vytvořený v celulóze izolace [13]. Obsah síry v minerálních olejích závisí na původu ropy a způsobu její rafinace. Pod vlivem vysokého elektrického a teplotního namáhání se síra obsažená v oleji může stát korozivní a dojde k chemické reakci s mědí. Řešením v takovém případě může být přidání inhibitoru koroze (pasivátoru), kterým je např. Irgamet 39 [13], [33]. Ten má pasivační účinky, což znamená, že je schopen vytvořit chemickým procesem ochrannou vrstvu, která korozi zabrání.

## 2.3 Možnosti rostlinných olejů

Neočekává se, že by rostlinné oleje v nejbližší době nahradily oleje na bázi ropných uhlovodíků. Nicméně jsou zde pokroky ve výzkumu přírodních esterů a nesmíme zapomenout, že tyto oleje mají určité vlastnosti, které minerální oleje předčí. Mezi hlavní výhody těchto olejů patří především vysoká teplota vzplanutí, která lehce přesahuje hodnotu 300 °C [16]. V porovnání s minerálním olejem, u kterých je tato teplota přibližně 130 ÷ 150 °C, jde o opravdu značný rozdíl [5], [34]. Mezi další výhody patří bezpochyby vysoká biodegradabilita a fakt, že se dá získávat z široce dostupných zdrojů [16].



Limitujícím faktorem těchto kapalin jsou jejich četné nevýhody. Pro rostlinné oleje je typický vysoký bod tuhnutí, jenž se může projevovat už při teplotách okolo  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dale špatná oxidační stabilita a problémy s odstraňováním vlhkosti [1], [16]. Z hlediska elektrické pevnosti tyto látky mohou vlivem konkrétního složení a degradačních činitelů vykazovat nestabilitu, což se při napěťových zkouškách projevuje v hodnotě variačního koeficientu a směrodatné odchylky [35]. Další nevýhodou představuje vyšší viskozita, která způsobí horší cirkulaci oleje a mimo jiné zvýší hmotnost transformátoru. S tím se musí počítat při projektování. V některých případech je možné zlepšit vlastnosti těchto olejů smícháním s minerálním olejem např. v poměru 80%/20%, což nepředstavuje dokonalé řešení problému, nicméně výsledky to přinést může [16].

Částečné řešení těchto problémů by mohli přinést nanotechnologie a aditiva. Nicméně s ohledem na dostupné zdroje je nanotechnologie zatím soustředěna téměř výhradně na minerální oleje. V budoucnu by ale mohla být tato úprava rostlinných olejů perspektivní cestou i pro přírodní estery. Do rostlinných olejů je možné přidat inhibitory, což může zlepšit jejich vlastnosti [35]. Aditiva řeší především problém tuhnutí a také špatný ztrátový činitel. To se většinou řeší např. přidáním 1 % polymethylakrylátu, který zlepšuje bod tuhnutí přibližně o  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vliv tohoto aditiva na ostatní parametry oleje je jen minimální [13].

### 3 Teorie přeskoku

Teorie přeskoku řeší problematiku dielektrik, konkrétně jevů, které nastávají při vystavení látky hodnotám dostatečně vysoké intenzity elektrického pole, aby stačila na zborcení vnitřní struktury daného dielektrika. Tyto jevy nebyly dosud dokonale popsány, avšak existují experimentálně získané poznatky, které lze využít pro alespoň částečné pochopení těchto mechanismů.

#### 3.1 Elektrická pevnost

Tuto vlastnost v praxi charakterizuje maximální velikost elektrického napětí na jednotku délky  $E_p$  [ $V \cdot m^{-1}$ ], při které je kapalně dielektrikum schopno odolat průrazu [5]. Závislost na intenzitě vnějšího elektrického pole je zde zřejmá. Velikost tohoto napětí je dána použitým materiálem, jeho vnitřní strukturou, obsahem nehomogenit atd. Při překročení maximální hodnoty zpravidla dochází vlivem působení elektrického pole k jevům, spadajícím do teorie přeskoku.

Mechanismus přeskoku nebyl do dnešní doby spolehlivě vysvětlen v komplexní a ucelené podobě. Existuje sice mnoho dílčích teorií a hypotéz, které popisují jednotlivé jevy a způsoby přeskoku v kapalném dielektriku, avšak některé z nich nejsou vzájemně slučitelné, a dokonce si odporují [5]. Výše zmiňovanou definici elektrické pevnosti lze matematicky popsat dle [5] takto:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (3)$$

kde  $U_p$  [V] je průrazné napětí a  $d$  [mm, cm] je nejmenší vzdálenost mezi elektrodami.

Základní vlastností izolantu je zabránit průchodu proudu mezi místy s rozdílným potenciálem. K takovému účelu ovšem nestačí pouze vysoká rezistivita materiálu, protože rezistivitu musíme v teorii o přeskoku chápat jako proměnnou hodnotu. Podle obsahu nečistot a nehomogenit v kapalném dielektriku může docházet k výrazným odchylkám od udané hodnoty a je třeba počítat i se stárnutím použité látky. Je nutné uvážit také vlivy okolního prostředí a velikost přiloženého napětí [5], [36], [37]. Velikost

intenzity elektrického pole působící na materiál může dosáhnout hodnoty, která způsobí nárůst počtu volných nosičů náboje v izolantu. V takových situacích rezistivita materiálu prudce klesne, což zapříčiní vznik elektrického výboje. Při tomto jevu mohou proudy dosahovat značných hodnot, přičemž konkrétní hodnota je závislá na vnitřním odporu zdroje, odporu elektrod a přívodních vodičů [5].

Procesy spojené s výbojem je možné podle [5], [36] rozdělit na dvě fáze. V první dochází k vytvoření dokonale vodivé cesty a vzniku samotného výboje. V druhé fázi se projeví důsledky vysokých proudů, které výboj způsobí. V místě přeskočení začne hořet elektrický oblouk, který doprovází vysoké teploty, záření a ionizační procesy. Vlivem těchto jevů dojde k nevyhnutelné degradaci materiálu. V případě látek pevného skupenství hovoříme o tzv. průrazu a jde o destruktivní proces. U látek plynného a kapalného skupenství hovoříme o tzv. přeskočení. Izolační schopnosti materiálu jsou sice ovlivněny, ale pouze dočasně, protože tyto látky jsou schopny regenerace [5].

Elektrická pevnost, tak jak je popsána na předchozích stranách práce, je při zkoumání elektrických výbojů klíčová. Její velikost je v praxi závislá na druhu a velikosti použitého izolantu. Dále na charakteru přiloženého napětí a době jeho působení, přičemž měření může být provedeno i za působení střídavého napětí. Na odolnost vůči přeskočení působí také okolní vlivy jako vlhkost, teplota, tlak atd. Významnost těchto jednotlivých vlivů však zatím nebyla spolehlivě popsána [5].

Působící elektrické pole může mít obecně dvojí charakter a to homogenní či nehomogenní [5], [36]. V případě homogenního pole je situace jasná z fyzikální podstaty, jenž lze teoreticky definovat. U nehomogenních polí je ovšem nutné brát tuto skutečnost v potaz. Pokud chceme hodnotu elektrické pevnosti brát za vypovídající, je nutné pro měření zajistit vždy stejné podmínky. Těch se v praxi často těžko dosahuje; zejména když uvážíme, že není dosud jasný význam jednotlivých činitelů ovlivňujících měření [5], [37].

## Elektrická pevnost kapalných izolantů

Ze všech skupenství je kapalně tím nejméně popsaným. Vzhledem k povaze kapalin není možné definovat přesný vliv všech činitelů, které se chovají náhodně a dají se jen velmi těžko kontrolovat [5], [36], [37]. Kromě příměsí v kapalinách, ať už se jedná o vodu nebo rozpuštěné plyny, je nutné počítat i s činiteli jako je tvar elektrod a jejich znečištění, rozložení pole v rámci měřeného dielektrika a samozřejmě i výše uvedené vnější a nedokonale popsané vlivy typu tlak, teplota atd. Při kombinaci všech těchto faktorů není dnes možné popsat přeskok uspokojivým způsobem. Experimentální výsledky sice přicházejí s určitými teoriemi, nejedná se však nikdy o zcela jednoznačný popis teorie přeskoků. Závěry výzkumů zpravidla platí pouze za konkrétních podmínek a vysvětlují pouze část jevu. Výsledkem jsou kusé informace, které nejsou vzájemně kompatibilní [5].

I přes ne zcela vysvětlený problém, je možné obecně popsat charakter kapalných izolantů podle [5] takto:

- výboj vzniká v blízkosti nečistot (plyny, pevné částice),
- hodnotu přeskového napětí může ovlivnit materiál elektrod a jejich povrchová úprava,
- přeskok může mít různý charakter (čistě elektrický, tepelný, atd.),
- V-A charakteristika technicky čistých kapalin je typická absencí oblasti nasycených proudů,
- kapalně izolanty obecně dosahují vyšší elektrické pevnosti než plynné.

Názory vědecké komunity na mechanismus přeskoků se dají rozdělit na dvě skupiny. První skupinu tvoří hypotézy založené na emisi elektronů z elektrody a nárazové ionizaci. V případě druhé skupiny přeskok způsobí plynové bublinky, které mohou vznikat různými způsoby [5], [36].

V prvním případě se může jednat buď o studenou emisi, jenž je způsobena působením silného elektrického pole nebo tzv. Schottkyho emisí, kdy je vlivem silného elektrického pole snížena bariéra, kterou musí elektrony překonat, aby se uvolnily z povrchu elektrody [5], [36].

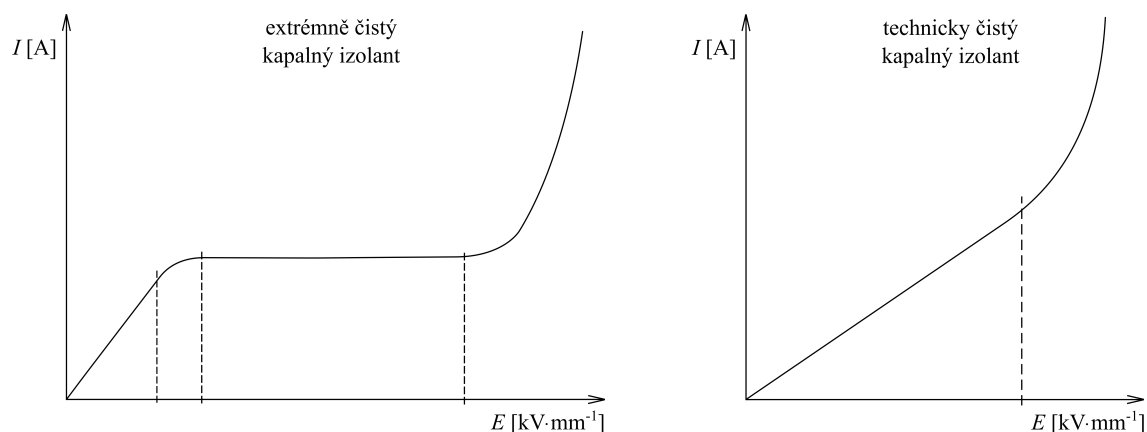
Druhá teorie se soustředí na přeskok v čistých kapalinách. To znamená, že se neuvažuje přítomnost plynů. Pokud v takovém případě plyn v kapalině vznikne, v souladu s hypotézami popsány v [5] a [36], dojde k radikálním změnám v chování kapaliny. To znemožňuje jednoznačný popis vlastností dané látky. Principy vzniku plynových nehomogenit v čisté kapalině jsou dle [5] následující:

- zadržením zbytků plynů na povrchu elektrody,
- zvýšením teploty průchodem vodivostního proudu,
- vznik z molekul vlastní kapaliny působením elektronů s dostatečně vysokou energií,
- na místech nerovnoměrného rozložení elektrického pole (nedokonalost elektrod).

V přirozeném stavu má bublinka v kapalině kulový tvar. Působením elektrostatických sil se v tomto případě roztáhne ve směru přiloženého pole. Vlivem této deformace může dojít k přeskoku. Elektrická pevnost zde závisí především na tlaku a teplotě [5], [36].

### **3.2 Technicky čisté kapalné izolanty**

Technicky čisté kapalné izolanty se od velmi čistých kapalných izolantů pro výzkumné účely výrazně liší. Tyto kapaliny jsou ovlivňovány více faktory. Konduktivita takových tekutin se většinou pohybuje v řádech  $10^{-11} \div 10^{-13} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  [5]. Jak je vidět na obr. 2, dochází k velkému rozdílu v průběhu voltampérových charakteristik. U technicky čistých kapalných izolantů je úplná absence nasycené oblasti.

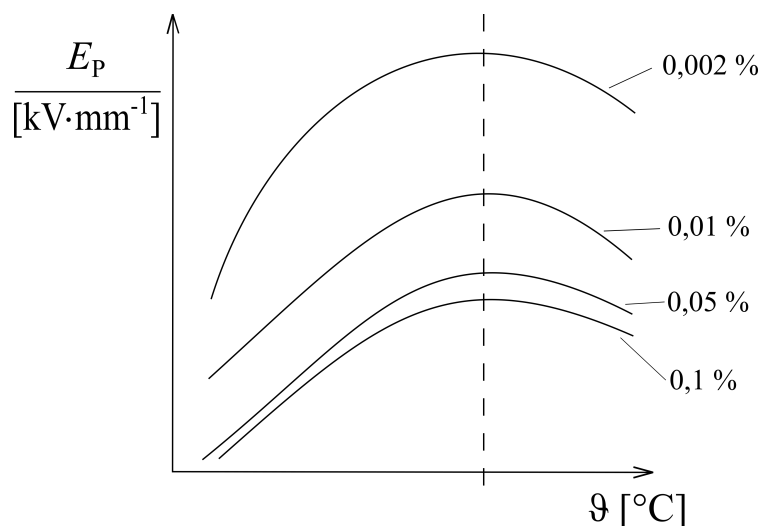


Obrázek 2: Voltampérová charakteristika extrémně a technicky čistých kapalných izolantů [5]

K výraznému zhoršení izolačních vlastností dochází vlivem přítomnosti nečistot. Ty mohou mít podobu koloidních částic nebo makroskopické látky/materiálu. Po vystavení vlivu elektrického pole dochází u takových částic k pohybu, což narušuje homogenitu pole [38]. Některé nečistoty jsou dokonce díky vyšší relativní permitivitě vtahovány do místa nejsilnější intenzity vnějšího elektrického pole (osa měřících elektrod), čímž vytvářejí pomyslný vodivý most. Ten snižuje elektrickou pevnost celého systému a usnadňuje přeskok [5], [36], [37].

I zde se nacházejí plynové bublinky, které jsou nejčastěji soustředěny v okolí elektrod. Vlivem přiloženého elektrického pole může docházet k ionizaci těchto nehomogenit. Tím se zvýší relativní permitivita a vzroste schopnost polarizace [5], [36]. Opět dochází k silovému působení a plynové bublinky se dostávají do osy měřících elektrod, resp. do místa kde je intenzita elektrického pole nejsilnější [9].

Významný vliv na elektrickou pevnost má obsah vlhkosti. Voda obsažená v kapalině může být rozpuštěná nebo v podobě emulze. Rozpuštěná voda většinou ovlivňuje elektrickou pevnost jen málo. Emulgovaná voda elektroizolační kapaliny významně degraduje [5]. Nicméně při vyšších teplotách dochází k procesu, při němž se voda v izolační kapalině rozpouští. Nejpriznivější hodnoty elektrické pevnosti pak podle [5] nastávají při teplotách okolo 65 °C, což je možné vidět v charakteristice na obr. 3.



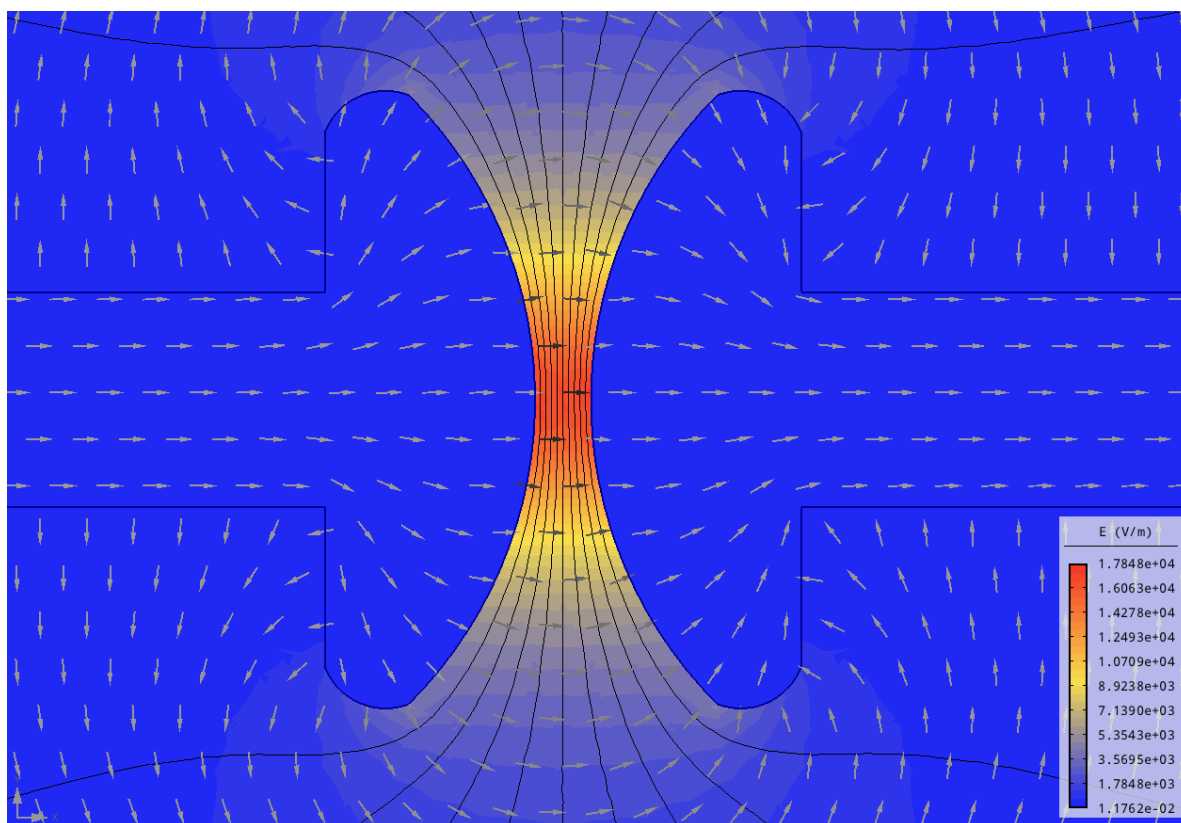
Obrázek 3: Teplotní závislost elektrické pevnosti minerálního oleje; parametrem je obsah vlhkosti [5]

Doba expozice v elektrickém poli výrazně ovlivňuje hodnotu elektrické pevnosti. Při impulzním namáhání je elektrická pevnost zpravidla mnohem vyšší. Hlavním důvodem je, že nečistoty obsažené v kapalině nemají čas se přesunout do místa nejvyšší intenzity elektrického pole a nemohou tak příliš degradovat elektroizolační systém [5], [37].

Elektrickou pevnost může ovlivnit také tlak. Ten ovlivňuje chování plynu v kapalinách, což může být v praxi poněkud matoucí. Nelze totiž jednoznačně říci, zda dojde ke zvýšení nebo snížení elektrické pevnosti. Z provedených experimentálních výzkumů je patrné, že plyny mění svou elektrickou pevnost při změně tlaku [5]. Tento jev lze částečně pozorovat i u kapalin, které plyny obsahují. Vše záleží na použité kapalině, množství obsaženého plynu, druhu plynu a charakteru přiloženého napětí.

Povrch elektrod může hrát roli při stanovení elektrické pevnosti, ale výraznější relativní vlivy byly prokázány pouze u velmi čistých kapalných izolantů [5]. U technicky čistých kapalných izolantů hraje roli především kvalita a čistota povrchu. Na povrchu elektrod mohou vznikat vrstvy oxidu nebo adsorbované plyny. Při odstranění těchto faktorů je vliv materiálu samotných elektrod u technicky čistých kapalných izolantů zanedbatelný [5], [37].

Na obr. 4 je možné vidět dvourozměrný model systému elektrod s nasimulovaným rozložením elektrického pole. Drobné šipky zde zobrazují směr intenzity elektrického pole, zatímco vertikálně tažené kontury představují ekvipotenciály. Přímá linie uprostřed naznačuje rozhraní s nulovým potenciálem. V souladu s teorií elektromagnetických polí je intenzita elektrického pole v každém bodě kolmá na ekvipotenciály. Barevným odlišením je v simulaci znázorněna velikost intenzity elektrického pole. Můžeme pozorovat, že největší intenzita je ve středu elektrod, kde je vzdálenost nejkratší, zatímco v elektrodách (vodičích) a jejich okolí je téměř nulová [6], [39]. Je tedy zřejmé, že právě v oblasti s největší intenzitou se dá očekávat elektrický přeskok. Této skutečnosti při delší expozici napomohou nečistoty, které se díky vyšší permitivitě začnou shromažďovat právě v tomto zúženém místě [5].



Obrázek 4: Simulace elektrického pole v okolí měřících elektrod aplikací Agros2D



### 3.3 Základní hypotézy přeskoku

Jak bylo řečeno, jednoznačná a úplná teorie přeskoku nebyla zatím vyřešena [5]. Existují jen hypotézy, popisující jevy, které mohou s přeskokem v dielektriku úzce souviset nebo být jeho příčinou. Tyto hypotézy jsou rozšířením základního rozdělení do dvou skupin popsaného výše; tedy teorie emise elektronů a teorie popisující důsledky plynových bublin. V souladu s [5], [36] lze rozdělit dnešní hypotézy takto:

- Plynová hypotéza - vlivem elektrod a samotného kapalného izolantu vznikají plynové bubliny. Působením elektrického pole dochází k silné deformaci těchto bublin, což vytvoří podmínky pro přeskok.
- Tepelná hypotéza - v prostoru mezi elektrodami dochází k rychlému nárůstu teploty. K přeskoku dochází v kapalině po překročení bodu varu.
- Plynově-tepelná hypotéza - příčinou přeskoku je plynová vrstva, jenž tvoří rozhraní mezi elektrodami a kapalinou. Vlivem elektrického působení dochází k lokálnímu nárůstu teploty kapaliny až k bodu varu, což představuje kritický stav.
- Hypotéza kapkového můstku - mezi elektrodami vzniká můstek z vodních kapek, které disociují na ionty a zachytávají se na povrchu můstku. Po překročení hodnoty elektrické pevnosti se ionty přesouvají a můstek se stává velmi dobrým vodičem.
- Hypotéza emise elektronů z katody - elektrony vzniklé studenou emisí vytvoří prostorový náboj, který vyvolá změny v intenzitě pole mezi elektrodami. Přeskok vzniká v místech s největším rozdílem potenciálu rovným hodnotě přeskokového napětí.
- Hypotéza zesilující se emise elektronů - podobná myšlenka jakou navrhuje předchozí hypotéza. Rozdílem je, že studená emise je zesílena ionty, jenž jsou obsaženy v polovodičové vrstvě na povrchu katody. Tím je opět narušena homogenita intenzity elektrického pole.
- Hypotéza emise a nárazové ionizace - elektrony ze studené emise vyvolávají nárazovou ionizaci. Prostorový náboj emisi navyšuje a napomáhá vzniku přeskoku.

- Hypotéza můstku z polarizovaných nečistot - cizí částice jsou vlivem polarizace vtahovány do místa s největší intenzitou elektrického pole a vytvářejí podmínky pro přeskok v podobě můstku mezi elektrodami.
- Hypotéza nárazové ionizace a interakce elektronů s částicemi kapaliny - průraz vzniká progresivně, pokud elektrony z elektrického pole obdrží více energie, než mohou ztratit v průběhu oscilací skupin atomů v molekulách kapaliny.
- Hypotéza shodná s teorií průrazu krystalů - přeskok je způsoben nárazovou ionizací. Vlivem působení elektrického pole získají elektrony uvolněné tunelovým jevem více energie, než mohou ztratit interakcí s částicemi kapalného izolantu.

## 4 Měření elektrické pevnosti

V případě měření elektrické pevnosti kapalných izolantů je v platnosti norma ČSN EN 60156: „Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda“ [40].

### 4.1 Popis napěťové zkoušky

U většiny materiálů a látek je elektrická pevnost dána intenzitou a dobou přiloženého napětí. Dále také délkou trvání výbojů před samotným přeskokem. Obecně lze říci, že čím větší je vzdálenost mezi elektrodami (v případě pevných izolantů tloušťka materiálu) a doba působení elektrického pole, tím je nižší i elektrická pevnost [5]. Degradacním účinkům podléhají i velmi dobré izolanty. Dochází např. k chemickému znečištění způsobené výbojovou činností za přítomnosti vlhkosti. Z tohoto důvodu se většinou provádí pouze pět napěťových zkoušek na jednom vzorku [36], [37], [41], [42]. Vlhkost a další negativní činitele je vhodné při výzkumných měřeních odstranit, ovšem pro účely měření vzorků používaných v praxi jsou speciální čistící procedury naopak nežádoucí, protože je nutné charakterizovat chování izolační kapaliny v provozních podmínkách [41], [42].

Pro měření elektrické pevnosti kapalných izolantů se používají semisférické elektrody s pevnou vzdáleností mezery 2,5 mm. U každého jednotlivého vzorku je provedeno 6 přeskoků, přičemž je potřebné nechat testovanou kapalinu po přeskoku zregenerovat. Doba regenerace oleje je 5 minut. Při přeskoku v kapalině v kratších intervalech je výrazně ovlivněna elektrická pevnost vzorku, což při měření není přípustné [5], [41], [42]. Z naměřených hodnot elektrické pevnosti je potřeba určit variační koeficient, který představuje hodnotu vypovídající o rozptylu naměřených hodnot [43], [44]. Velký rozptyl, tedy vysokou hodnotu variačního koeficientu může způsobit řada faktorů. Častou možností je chyba při měření (např. nedodržení předepsaného intervalu). Pokud je tedy hodnota variačního koeficientu větší než 20 %, je vhodné zopakovat měření s novým vzorkem ze stejného zdroje. Pokud se hodnota variačního koeficientu nezlepší je vzorek klasifikován jako nevyhovující [5]. Variační koeficient bývá vyšší zejména u rostlinných olejů, což je dáno jejich horší fyzikálně-chemickou stabilitou. Možností, jak tyto projevy

zmírnit je přidání inhibitorů, ovšem na průměrnou hodnotu elektrické pevnosti velký vliv zpravidla nemají [35].

Napěťové zkoušky s využitím střídavého napětí je možné popsat podle [5], [42]. Zdrojem je vysokonapěťový transformátor napájený z nízkonapěťového zdroje. Průběh napětí je sinusový. Pro všechna napětí až do přeskočení musí být poměr maximální a efektivní hodnoty zkušební napětí  $\sqrt{2} \pm 5\%$ . Zdroj musí být schopen dodat dostatečně velký výkon a proud. Obvod elektrod může být zapojen přímo nebo být doplněn převodním transformátorem, příp. děličem. Konečná chyba měření by měla být do 5% měřené hodnoty. Přístroj musí být schopen udržet maximální výchylku/hodnotu napětí, při které došlo k přeskočení. Zároveň nesmí být náchylný na vlivy přechodových jevů a překmitů, ke kterým dochází zejména při samotném přeskočení.

## 4.2 Popis měření

V tomto experimentu bylo použito střídavé napětí s rychlým lineárním nárůstem. Hodnota napětí byla zvyšována rychlostí  $2 \text{ kV}\cdot\text{s}^{-1}$ . V souladu s normou bylo také použito 350÷600 ml oleje, který byl předtím zbaven vlhkosti. Zkušební komora měla předepsaný typ elektrod a také vzdálenost elektrod, jež je dána normou na  $2.5\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$ . Na obr. 5 je možné vidět vysokonapěťový transformátor, který byl použit. Je schopný dodat střídavé napětí do velikosti až 200 kV. Na obr. 6 je vyfocen skutečný systém elektrod použitý pro měření, který normu také splňuje. Bylo provedeno celkem 6 měření přeskočení pro každý olej, přičemž po přeskočení bylo oleji ponecháno 5 minut na regeneraci. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny na základě statistických výpočtů podle příslušné literatury [43], [44]. Celé měření probíhalo za pokojové teploty a normálního atmosférického tlaku.



Obrázek 5: Vysokonapěťový transformátor pro měřicí účely ( $\leq 200$  kV)



Obrázek 6: Systém měřících elektrod použitých pro testování vzorků

Celkem bylo testováno sedm různých olejů, z toho jeden minerální, jeden syntetický a pět rostlinných. Pro experiment byly vybráni zástupci známých olejů, u kterých lze dohledat, prostřednictvím katalogových listů, informace přímo na stránkách jednotlivých výrobců. Byly testovány tyto oleje:

- Shell Diala DX - Jedná se o minerální olej. Výrobce udává hodnotu průrazného napětí pro olej v dodaném stavu větší než 60 kV. Teplota tuhnutí je okolo  $-60^{\circ}\text{C}$  a bod vzplanutí  $138^{\circ}\text{C}$ . Má nízký obsah síry [45].
- MIDEL 7131 - zástupce syntetických esterů. Běžná hodnota přeskovového napětí je podle výrobce okolo 75 kV. Jeho hlavní výhodou by měla být jeho oxidační stabilita. V tekutém stavu zůstává až do hodnoty  $-60^{\circ}\text{C}$ . Udávaný bod vzplanutí je více než  $300^{\circ}\text{C}$ , což je podle IEC standardu nejvyšší možná třída „K“. Zároveň by v případě havárie měl být šetrný vůči životnímu prostředí [46].
- MIDEL eN - olej rostlinného původu. Podle výrobce je použitelný pro výkonové transformátory. Stejně jako MIDEL 7131 i tento olej je velmi odolný vůči vzplanutí až do teplot nad  $300^{\circ}\text{C}$ . Sám výrobce však na svých stránkách uvádí, že tento olej má horší oxidační stabilitu, což znamená, že je vhodný spíše pro hermeticky uzavřený transformátor (tzv. sealed-oil design) nebo transformátor s konzervátorem. Také tuhne při poměrně vysokých teplotách, což je pro rostlinné oleje typické [47].
- Další oleje - mezi další testované oleje byly zařazeny běžné slunečnicové a řepkové oleje. Některé vzorky byly inhibovány pro zjištění vlivu těchto aditiv na hodnotu průrazného napětí a stabilitu během měření.

Vlastnosti olejů byly testovány ve dvou stavech. V prvním případě byl olej vystaven účinkům elektrického pole v dodaném stavu a v druhém případě byl testován vzorky stejných olejů, ovšem v zestárlém stavu. Stárnutí olejů bylo zajištěno uměle, přičemž kapaliny byly vystaveny teplotě přibližně  $180^{\circ}\text{C}$  po dobu dvou týdnů. Tímto způsobem bylo možné prověřit vliv stárnutí izolační kapaliny na elektrickou pevnost.

### 4.3 Vyhodnocení statistických ukazatelů

Při stanovení výsledků měření byly použité čtyři parametry. Prvním je průměrná hodnota průrazného napětí, což představuje aritmetický průměr z naměřených hodnot. Podle [41], [43] ji lze matematicky vyjádřit takto:

$$\bar{U}_p = \frac{1}{n} \sum_1^n U_x \text{ [kV]} \quad (4)$$

Dalším parametrem je směrodatná odchylka  $\sigma$ , která obecně vyjadřuje kvadratický průměr odchylek hodnot znaku - v tomto případě přeskokového napětí - od jejich aritmetického průměru [43]. To znamená, že poukazuje na to, zda jsou naměřené hodnoty v blízkosti aritmetického průměru; tedy zda během měření nedocházelo k výrazným výkyvům od předpokládané hodnoty průrazného napětí. Určujeme jí jako odmocninu z rozptylu (variance), což je hodnota, která také vyjadřuje odchýlení od aritmetického průměru, ale nikoliv v jednotkách měřené veličiny. Vztahy pro výpočet je dle [43], [44] možné vyjádřit následovně:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_1^n (U_x - \bar{U}_p)^2 \text{ [kV}^2\text{]} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \text{ [kV]}, \quad (6)$$

kde  $\sigma^2$  označuje rozptyl měřené veličiny.

Důležitým statistickým parametrem je variační koeficient, který vztahuje směrodatnou odchylku na aritmetický průměr naměřených hodnot. Po prozkoumání níže uvedeného vztahu je zřejmé, že jde o vyjádření směrodatné odchylky v procentech, což je z hlediska vyhodnocení výsledků experimentu pohodlnější. Variační koeficient lze spočítat podle [43], [44] takto:

$$v = \frac{\sigma \cdot 100}{\bar{U}_p} [\%] \quad (7)$$

Posledním stanoveným parametrem je medián. Medián je vhodný zejména u měření, kde může dojít ke značnému odstupu jedné hodnoty od ostatních. Takový extrém znemožní objektivní posouzení na základě aritmetického průměru, avšak medián není tímto výkyvem ovlivněn. Podle [43], [44] představuje střední hodnotu statistického souboru naměřených hodnot a dá se vyjádřit následovně:

$$\tilde{U}_p = \frac{U_{n/2} + U_{(n+2)/2}}{2} [kV] \quad (8)$$



Druh oleje	$U_P$ [kV]					
	1. Slunečnicový inhibovaný	63,83	67,67	71,89	66,59	69,72
2. Slunečnicový neinhibovaný	62,65	59,55	57,26	76,23	64,69	62,22
3. Řepkový inhibovaný	59,55	63,57	67,14	58,02	65,23	56,67
4. Řepkový neinhibovaný	56,26	77,28	55,41	58,23	68,11	53,96
5. Minerální olej Shell Diala	60,78	60,39	54,52	56,54	68,45	58,53
6. MIDEL EN	58,06	64,10	71,74	59,27	67,97	58,51
7. MIDEL 7131	57,95	75,75	54,57	59,29	66,16	61,35

Tabulka 1: Naměřené hodnoty průrazných napětí vzorků v dodaném stavu

Druh oleje	$\bar{U}_P$ [kV]	$\sigma$ [kV]	V [%]
1. Slunečnicový inhibovaný	68,12	2,53	3,72
2. Slunečnicový neinhibovaný	63,77	6,05	9,49
3. Řepkový inhibovaný	61,70	3,85	6,24
4. Řepkový neinhibovaný	61,54	8,41	13,67
5. Minerální olej Shell Diala	59,87	4,40	7,35
6. MIDEL EN	63,28	5,17	8,17
7. MIDEL 7131	62,51	6,88	11,01

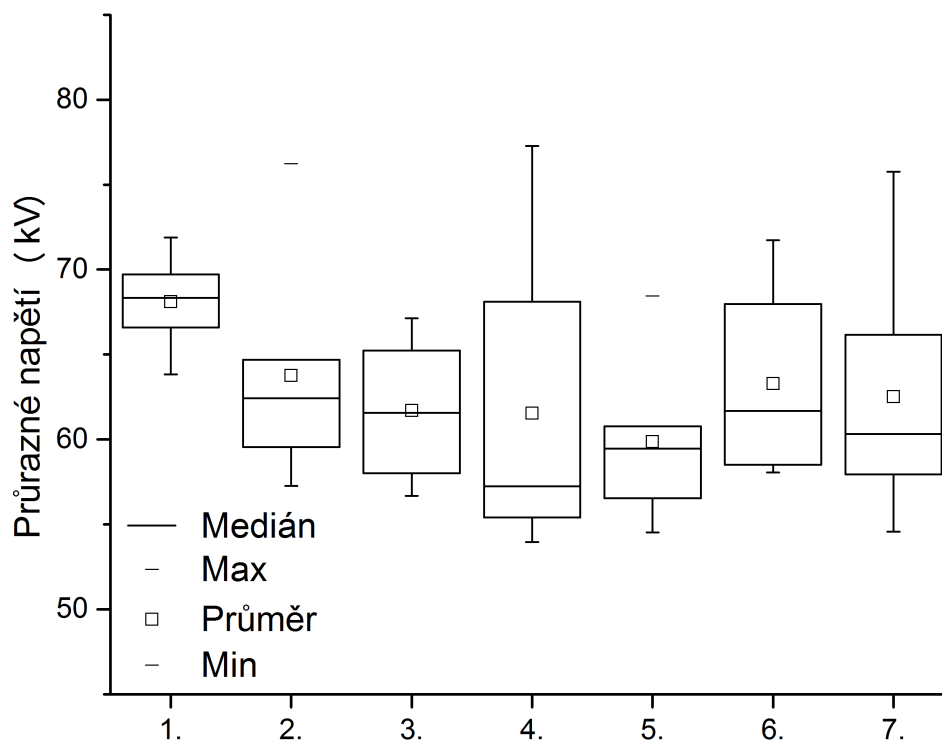
Tabulka 2: Výsledky statistických výpočtů z naměřených hodnot vzorků v dodaném stavu

Druh oleje	$U_P$ [kV]					
	1. Slunečnicový inhibovaný	44,53	73,29	56,45	48,98	62,27
2. Slunečnicový neinhibovaný	42,44	57,46	55,5	68,17	57,61	56,65
3. Řepkový inhibovaný	57,03	59,25	53,54	44,73	46,4	60,23
4. Řepkový neinhibovaný	58,03	61,22	70,43	53,89	62,16	40,23
5. Minerální olej Shell Diala	61,05	71,79	50,21	70,15	58,57	75,42
6. MIDEL EN	73,16	64,78	79,09	73,01	54,62	69,13
7. MIDEL 7131	59,53	46,13	52,95	54,67	74,73	46,32

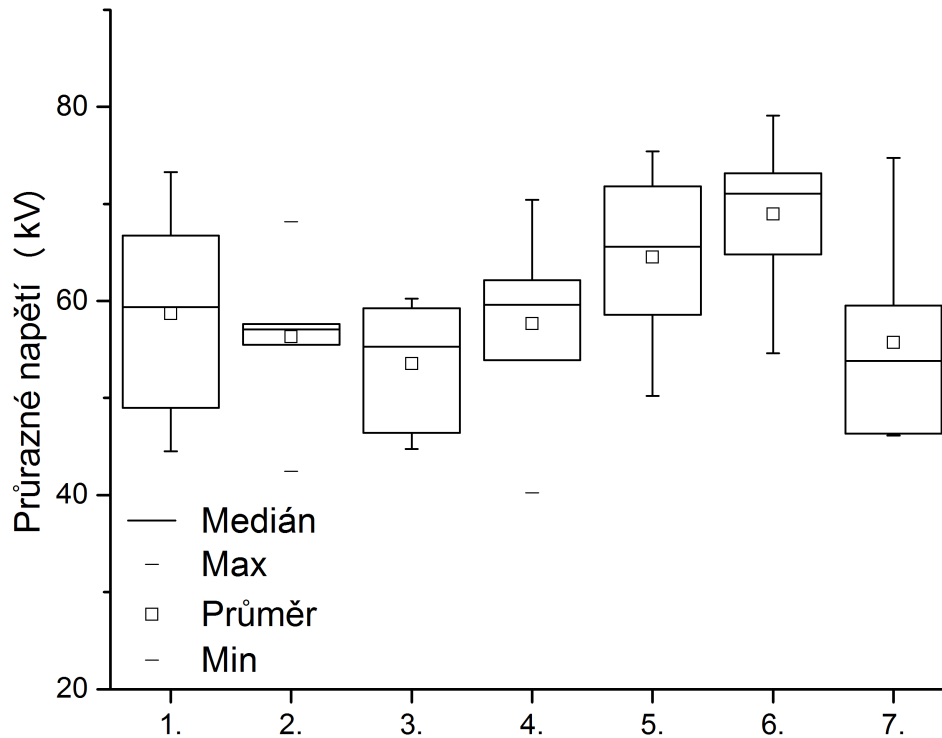
Tabulka 3: Naměřené hodnoty průrazných napětí zestárlých vzorků

Druh oleje	$\bar{U}_P$ [kV]	$\sigma$ [kV]	$V$ [%]
1. Slunečnicový inhibovaný	58,71	9,92	16,90
2. Slunečnicový neinhibovaný	56,31	7,49	13,31
3. Řepkový inhibovaný	53,53	6,03	11,26
4. Řepkový neinhibovaný	57,66	9,26	16,05
5. Minerální olej Shell Diala	64,53	8,71	13,50
6. MIDEL EN	68,97	7,74	11,23
7. MIDEL 7131	55,72	9,70	17,42

Tabulka 4: Výsledky statistických výpočtů z naměřených hodnot zestárlých vzorků



Obrázek 11: Grafické zobrazení statistických hodnot vzorků v dodaném stavu



Obrázek 12: Grafické zobrazení statistických hodnot zestárlých vzorků

#### 4.4 Diskuze výsledků měření

Z naměřených hodnot a příslušných statistických údajů je možné charakterizovat jednotlivé izolační kapaliny. Je zřejmé, že hodnota přeskokového napětí je u rostlinných olejů srovnatelná s výsledky minerálních či syntetických kapalin; často i vyšší. U všech olejů došlo ke snížení hodnoty elektrické pevnosti po procesu tepelného stárnutí, čímž byl potvrzen jeho vliv. Rozdíly nejsou však tak významné, jak se očekávalo. To je pravděpodobně způsobeno krátkou dobou stárnutí (pouze dva týdny). Některé kapaliny přesto na proces stárnutí reagovali významně. U slunečnicového inhibovaného oleje došlo k velkému poklesu přeskokového napětí z průměrné hodnoty 68,12 kV na 58,71 kV, což je téměř o 14 %. Přibližně o stejnou procentuální hodnotu se zvýšil i variační koeficient, což poukazuje na značné rozdíly v hodnotách průrazného napětí při měření v zestárlém stavu. Podobné výkyvy mohou být pozorovány i u syntetického esteru MIDEL 7131, který ovšem vykazoval mírnou nestabilitu i u vzorku v dodaném stavu. Po dvou týdnech tepelného stárnutí skoro překonal limitní hodnotu variačního koeficientu 20%. MIDEL eN, jakožto ester na přírodní bázi, vykazoval velmi stabilní výsledky. Průměrná hodnota průrazného napětí překonala v obou měřeních hodnotu 60 kV a i statistické ukazatele se vlivem teplotního stárnutí příliš nezměnily.

Významný vliv inhibitorů na průrazné napětí nebyl při měření přímo prokázán. Je vidět, že u inhibovaných vzorků dochází k výraznějším rozdílu oproti střední hodnotě průrazného napětí, ale nelze s jistotou říci, zda je tato skutečnost způsobená přítomností inhibitorů. Z tohoto experimentu se to však zdá být pravděpodobné. Vliv aditiv mohl díky procesu umělého stárnutí poklesnout. Tuto hypotézu je možné vznést na základě nízkých hodnot statistických činitelů u nových vzorků a naopak prudkého zhoršení při druhém měření. Naopak neinhibované vzorky prokazovali v dodaném stavu méně stabilní hodnoty, ale nedošlo k tak výraznému rozdílu po procesu stárnutí. Pro potvrzení domněnky vlivu inhibitorů by však bylo nutné provést opakovaná měření s novými vzorky.

## 5 Závěr

V práci byly popsány parametry jednotlivých izolačních kapalin. Uvedené informace potvrzují, že minerální oleje jsou díky svým stabilním vlastnostem, výrobní ceně a životnosti stále nezastupitelné. Během posledních let došlo k velkému pokroku ve výzkumu přírodních esterů, nicméně stále vykazují příliš nestabilní vlastnosti pro masové použití ve výkonových transformátorech. Zejména chemické procesy a vlivy stárnutí degradují nejen kapalnou, ale i pevnou složku izolačního systému. V kombinaci s vyšší viskozitou a ztrátovým činitelem  $tg \delta$  jsou v náročných aplikacích nevyhovující.

Vzhledem k nedávným úspěchům s využitím nanotechnologie k posílení vlastností minerálních olejů se domnívám, že by bylo možné tyto postupy aplikovat i na rostlinné oleje. Vzhledem k jejich nestabilním vlastnostem to ovšem není tak jednoduché a bude potřeba najít vhodné látky, které bude možné kombinovat s aditivami. Dalším částečným řešením zůstává kombinace různých druhů olejů.

Kapalné izolanty jsou chaotickým médiem a je těžké je popsat na úrovni elementárních částic. Z existujících hypotéz lze říci alespoň to, že velký vliv na elektrickou pevnost má přítomnost nečistot a příměsí, zejména pak pevné částice, obsah vody v emulgovaném stavu a obsah plynů.

V praktické části byly vyhodnoceny různé druhy olejových vzorků. Byly měřeny jak v dodaném stavu, tak po procesu stárnutí, přičemž umělé stárnutí působilo na vzorky po dobu dvou týdnů při teplotě 180 °C. Zkoumán byl zejména rozdíl mezi minerálními a rostlinnými oleji. Prokázalo se, že oleje rostlinného původu dosahují srovnatelných hodnot přeskokového napětí jako oleje minerální. Nicméně se u nich objevila mírná nestabilita po procesu umělého stárnutí. Statistické hodnoty poukazují na vliv aditiv, ovšem v této fázi se jedná pouze o domněnku. Pro posouzení skutečnosti je zapotřebí provést rozsáhlejší měření.

Pro další experiment bych doporučil ponechat delší dobu stárnutí. U naměřených hodnot přeskokového napětí by tak došlo k výraznějšímu projevu degradace, což by zajistilo snadnější vyhodnocení stavu vzorků i vzájemných rozdílů. Zároveň by bylo vhodné provést měření ztrátového činitele  $tg \delta$  pro posouzení vlivu aditiv.

## Reference

- [1] P. TRNKA, R. POLANSKÝ. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír*. Electroscope [online]. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2007 [cit. 2016-03-04]. ISSN 1818-4564. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>
- [2] ILYAS, Suwarno. *Study on the Characteristics of Jatropha and Ricinus Seed Oils as Liquid Insulating Materials..* In: 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [online]. IEEE, 2006, s. 162-165 [cit. 2016-03-04]. DOI: 10.1109/CEIDP.2006.312086. ISBN 1-4244-0546-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4105394>
- [3] SUN, Caixin, Jian LI, Xiaohu LI a S. GRZYBOWSKI. *Electric Properties of Vegetable Oil-Based Dielectric Liquid and Lifetime Estimation of the Oil-Paper Insulation..* In: 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [online]. IEEE, 2006, s. 680-683 [cit. 2016-03-04]. DOI: 10.1109/CEIDP.2006.312023. ISBN 1-4244-0546-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4105524>
- [4] SEMAT, Henry, Robert KATZ. *Physics: Chapter 28: Electrical Conduction in Liquids and Solids*. [online]. New York: Rinehart, 1958 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1163&context=physicskatz>
- [5] MENTLÍK, Václav *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [6] JAVORSKÝ, L., BOBEK, A., MUŠIL, R. *Základy elektrotechniky pro střední průmyslové školy elektrotechnické*. 7., nezměněné vyd. Praha : SNTL. 1981. 390 s. ISBN nemá.
- [7] KOBLÍŽEK, Vilém. *Dielektrické vlastnosti tuhých látek*. [online]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2005 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_4.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf)

- [8] JÁNEŠ, Vlastimil *Elektrická vodivost v pevných látkách, kapalinách, plynech a ve vakuu*. ELT1 Přednáška č. 5. [online]. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE - FAKULTA DOPRAVNÍ, 2013 [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/Elektrotechnika1/ELT1.html>
- [9] RAJU, Gorur G. *Dielectrics in electric fields*. New York: Marcel Dekker, c 2003. ISBN 0824708644.
- [10] REŇÁK, Ladislav. *Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin*. [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40101](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40101). Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Martin Frk.
- [11] G. M. MORARU, A. NIAGU, G. VIZITEU, P. ANDREI a B. FLOREAN. *Studies about the breakdown voltage of some liquids insulators*. In: 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering [online]. IEEE, 2012, s. 120-124 [cit. 2016-03-23]. DOI: 10.1109/ICEPE.2012.6463941. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6463941>
- [12] PROSR P., PIHERA J., POLANSKÝ R., TRNKA P. *Teplotní stabilita izolačních kapalin*. Electroscope [online]. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2007 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/62.pdf>
- [13] FOFANA, I. *50 years in the development of insulating liquids*. IEEE Electrical Insulation Magazine [online]. 2013, 29(5), 13-25 [cit. 2016-05-21]. DOI: 10.1109/MEI.2013.6585853. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6585853>

- [14] SOUČEK, J., HORNAK, J., MENTLÍK, V., TRNKA, P., SVOBODA, M. *Diagnosis of dissipation factor and breakdown voltage of alternative insulating liquids*. In Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015). Plzeň: Západočeská univerzita, 2015. s. 1-4. ISBN: 978-80-261-0476-6
- [15] NAIDER, J. *Elektrické vlastnosti alternativních kapalin pro elektrotechniku* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=105722](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105722). Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Martin Frk.
- [16] TRNKA, Pavel, Vaclav MENTLIK a Michal SVOBODA. *Ecologically acceptable insulating liquids for electrical appliances*. In: 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL) [online]. IEEE, 2014, s. 1-4 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/ICDL.2014.6893121. ISBN 978-1-4799-2063-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6893121>
- [17] SVOBODA M., TRNKA P. *Alternative electrical insulating fluids in power transformers*. In: Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) [online]. IEEE, 2014, s. 399-402 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839419. ISBN 978-1-4799-3807-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6839419>
- [18] MU-TIAN, Chen, Du YUE-FAN, Lv YU-ZHEN, Zhou JIAN-QUAN, Li XIAOXIN a Li CHENG-RONG. *Effect of nanoparticles on the dielectric strength of aged transformer oil*. In: 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [online]. IEEE, 2011, s. 664-667 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1109/CEIDP.2011.6232744. ISBN 978-1-4577-0986-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6232744>



- [19] YUEFAN DU, YUZHEN LV, CHENGRONG LI, MUTIAN CHEN, YUXIANG ZHONG, JIANQUAN ZHOU, XIAOXIN LI a YOU ZHOU. *Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2012, 19(3), 770-776 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6215079. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6215079>
- [20] LV, Yuzhen, Wei WANG, Kaibo MA, Shengnan ZHANG, You ZHOU, Chengrong LI a Qi WANG. *Nanoparticle Effect on Dielectric Breakdown Strength of Transformer Oil-Based Nanofluids*. In: 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [online]. IEEE, 2013, s. 680-682 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1109/CEIDP.2013.6747090. ISBN 978-1-4799-2597-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6747090>
- [21] SIMA, Wenxia, Jian SHI, Qing YANG, Sisi HUANG a Xuefei CAO. *Effects of conductivity and permittivity of nanoparticle on transformer oil insulation performance: experiment and theory*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2015, 22(1), 380-390 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004277. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7033408>
- [22] DU, Yue-fan, Yu-zhen LV, Fo-chi WANG, Xiao-xin LI a Chengrong LI. *Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil*. In: 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation [online]. IEEE, 2010, s. 1-3 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549772. ISBN 978-1-4244-6298-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5549772>

- [23] MANSOUR, Diaan-Eldin A., Eman G. ATIYA, Reham M. KHATTAB a Ahmed M. AZMY. *Effect of titania nanoparticles on the dielectric properties of transformer oil-based nanofluids*. In: 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [online]. IEEE, 2012, s. 295-298 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/CEIDP.2012.6378779. ISBN 978-1-4673-1252-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6378779>
- [24] YU-ZHEN LV, XIAO-XIN LI, YUE-FAN DU, FO-CHI WANG a CHENGRONG LI. *Preparation and breakdown strength of TiO<sub>2</sub> fluids based on transformer oil*. In: 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [online]. IEEE, 2010, s. 1-3 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/CEIDP.2010.5723974. ISBN 978-1-4244-9468-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5723974>
- [25] PISLARU-DANESCU, Lucian, Alexandru M. MOREGA, Gabriela TELIPAN, Mihaela MOREGA, Jean Bogdan DUMITRU a Virgil MARINESCU. *Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering*. IEEE Transactions on Magnetics [online]. 2013, 49(11), 5489-5497 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2271607. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6549142>
- [26] MARTON K., TOMČO L., CIMBALA R., KOLCUNOVÁ I., KONE-RACKÁ M., TIMKO M. *Využitie magnetickej kvapaliny v izolačnom systéme transformátora* Starnutie elektroizolačných systémov [online]. Košice: Energo Consulting s.r.o., 2009, 4(7) [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://jeen.fei.tuke.sk/index.php/JSES/article/view/136>
- [27] B. X. Du, X. L. Li, J. Li *Thermal Conductivity and Dielectric Characteristics of Transformer Oil Filled with BN and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles* IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2015, 22(5), 2530-2536 [cit. 2016-05-19]. DOI: 10.1109/TDEI.2015.005079. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7311027>

- [28] MANSOUR, Diaa-Eldin A. a Ahmed M. ELSAEED. *Heat transfer properties of transformer oil-based nanofluids filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles*. In: 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon) [online]. IEEE, 2014, s. 123-127 [cit. 2016-05-21]. DOI: 10.1109/PECON.2014.7062426. ISBN 978-1-4799-7297-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7062426>
- [29] R. SAIDUR, K. Y. LEONG, H. A. MOHAMAD *A review on applications and challenges of nanofluids*. *Renew. Sustain. Ener. Rev.*, vol. 15, 1646–1668, 2011.
- [30] M. AMUNALLAH and A. M. AL-TAHINI *Nano-technology - It's significance in smart fluid development of oil and gas field application*. SPE 126102 presented at the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Alkhobar, Saudi Arabia, 9–11 May, 2009.
- [31] *Standard Specifications for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus* ASTM D3487 - 09, 2009.
- [32] *Fluids for Electrotechnical Applications - Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear*. IEC 60296 4th ed., 2012.
- [33] ARVIDSSON L., RAVNEMYHR E. *A Reason for „Corrosive Sulfur“ Failures*. IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL) [online]. 2014, 1-7 [cit. 2016-05-21]. DOI: 10.1109/ICDL.2014.6893140. ISSN 2153-3725. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6893140>
- [34] Martin TRČKA, Lenka KLIMKOVÁ, Bohdan FILIPI, Hana VĚŽNÍKOVÁ. *Vliv stárnutí transformátorového oleje na jeho bezpečnostní parametry*. *Chemické listy* [online]. Ostrava: Fakulta Bezpečnostního inženýrství, Katedra Bezpečnostního Managementu a Katedra požární ochrany, 2015, [cit. 2016-05-21]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: [http : //www.chemicke – listy.cz/docs/full/2015\\_12\\_957 – 959.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2015_12_957-959.pdf)

- [35] SOUCEK, Jakub, Jaroslav HORNAK, Michal SVOBODA, Miroslav GUTTEN a Tomasz KOLTUNOWICZ. *Comparison of the electrical properties of canola oil with commercially available mineral oil*. In: 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) [online]. IEEE, 2015, s. 634-637 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161087. ISBN 978-1-4673-6788-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7161087>
- [36] I. Balygin. *Electric Stregth of liquid dielectric*. Foregin Technology Division Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1972.
- [37] KOK, J. A. a M. M. G. CORBEY. *Aspects of electrical breakdown of liquid insulating material I*. Applied Scientific Research, Section B [online]. 1959, 7(1), 257-264 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1007/BF02921913. ISSN 0365-7140. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02921913>
- [38] KOK, J. A. a C. E. G. M. M. VAN VROONHOVEN. *Aspects of electrical breakdown of liquid insulating material II*. Applied Scientific Research, Section B [online]. 1961, 9(2), 125-132 [cit. 2016-05-28]. DOI: 10.1007/BF02930885. ISSN 0365-7140. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02930885>
- [39] HAŇKA L. *Teorie elektromagnetického pole 2*. Praha: SNTL, 1982. ISBN nemá.
- [40] ČSN 60 156 *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda. 2*. Praha: ORGREZ, a. s., 1995.
- [41] MENTLIK V. *Diagnostika izolantů 1*. Plzeň: VŠSE v Plzni - ediční středisko, 1986.
- [42] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [43] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4273-1.

- [44] CALDA, Emil a Václav DUPAČ. *Matematika pro gymnázia: kombinatorika, pravděpodobnost, statistika*. 5.vyd. Praha: Prometheus, 2012. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 978-80-7196-365-3.
- [45] *Shell Diala S3 ZX-I Dried (Shell Diala DX Dried) - Technical Data Sheet*. Shell [online]. The Netherlands: Shell, 2011 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: [http://www.sieuthidaunhot.com/media/images/products/fileupload/256\\_1\\_Shell%20Diala%20S3%20ZX-I.pdf](http://www.sieuthidaunhot.com/media/images/products/fileupload/256_1_Shell%20Diala%20S3%20ZX-I.pdf)
- [46] *MIDEL 7131 - Technical information pack*. MIDEL [online]. United Kingdom: MIDEL, 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.midel.com/library>
- [47] *MIDEL eN 1204 - Technical information pack*. MIDEL [online]. United Kingdom: MIDEL, 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.midel.com/library>