

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Perspektivní biologicky odbouratelné nanokapaliny

Autor práce: **Bc. Zdislava Mokrá**
Vedoucí práce: **prof. Ing. Pavel Trnka, Ph.D**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdislava MOKRÁ**
Osobní číslo: **E21N0022P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Perspektivní biologicky odbouratelné nanokapaliny**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši v oblasti biodegradabilních elektroizolačních kapalin a nanokapalin.
2. Popište metody přípravy nanokapalin.
3. Popište diagnostické metody vhodné pro popis vlastností elektroizolačních kapalin.
4. Připravte několik vzorků nanokapalin a změřte jejich vlastnosti.
5. Zhodnoťte jednotlivé metody diagnostiky a výsledné vlastnosti nanokapalin.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **5**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Kol. autorů, Engineering Dielectric Liquid Applications, , MDPI –Basel&Beijing, Book Editor: FOFANA I., ISBN 978-3-03897-402-4, 2018, p. 160, dostupné: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2756/htm>.
2. MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2008, 439 s. ISBN: 978-80-7300-232-9.
3. Elektronické informační zdroje.


Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



L.S.

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



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

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou biodegradabilních elektroizolačních kapalin a nanokapalin, jejich historickým vývojem a výhodami/nevýhodami které poskytují. Jsou zde uvedeni hlavní zástupci komerčně dostupných elektroizolačních kapalin. Dále jsou zde popsány možné metody přípravy nanokapalin a možnosti jejich stabilizace. Je zde provedena krátká rešerše objasňující výběr nanočástic použitých v praktické části. Jedním z bodů je také diagnostika kapalin a nanokapalin – jejich dielektrické a fyzikálně-chemické vlastnosti. V praktické části je popsána příprava nanokapaliny, její diagnostika a zhodnocení naměřených vlastností.

Klíčová slova

Biologicky odbouratelná izolační nanokapalina, biologicky odbouratelná izolační kapalina, izolační kapalina na bázi přírodních esterů, metody přípravy nanokapaliny, one-step metoda, two-step metoda, Envirotemp FR3, MIDEL eN 1215, MIDEL eN 1204, BIOTEMP, ENVITRAFOL, stabilizace nanokapalin, elektrostatická stabilizace, stérická stabilizace, BN izolační nanokapalina na bázi esteru, SiN izolační nanokapalina na bázi esteru, TiO₂ izolační nanokapalina na bázi esteru, ZnO izolační nanokapalina na bázi esteru, SiO₂ izolační nanokapalina na bázi esteru, diagnostika izolačních kapalin, přeskokové napětí, ztrátový činitel, relativní permitivita, vnitřní rezistivita, obsah vody, viskozita nanokapalin, číslo kyselosti

Abstract

The thesis deals with the issue of biodegradable electroinsulating liquids and nanofluids, their historical development and their advantages and disadvantages. The main representatives of commercially available electrical insulating liquids are presented. Furthermore, possible methods for the preparation of nanofluids and the possibilities of their stabilization are described. A short survey is made to clarify the selection of nanoparticles used in the practical part. One of the points is also the diagnosis of liquids and nanofluids – their dielectric and physicochemical properties. The practical part describes the preparation of the nanofluid, its diagnostics and the evaluation of the measured properties.

Key Words

Biodegradable insulating nanofluid, biodegradable insulating liquid, insulating liquid based on natural esters, methods of preparation of nanofluid, single step method, two-step method, Envirotemp FR3, MIDEL eN 1215, MIDEL eN 1204, BIOTEMP, ENVITRAFOL, stabilization of nanofluids, electrostatic stabilization, steric stabilization, BN ester-based insulating nanofluid, SiN ester-based insulating nanofluid, TiO₂ ester-based insulating nanofluid, ZnO ester-based insulating nanofluid, SiO₂ ester-based insulating nanofluid, insulating liquid diagnostics, breakdown voltage, dissipation factor, relative permittivity, internal resistivity, water content, viscosity of nanofluids, acid number

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D za trpělivost, ochotu, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|--|--------|
| Úvod | - 1 - |
| 1 Biodegradabilní elektroizolační kapaliny | - 2 - |
| 1.1 Historický kontext | - 2 - |
| 1.2 Přírodní estery jako izolační kapaliny | - 4 - |
| 1.3 Komerčně dostupné biodegradabilní elektroizolační kapaliny | - 6 - |
| 1.3.1 Envirotemp FR3 | - 6 - |
| 1.3.2 MIDEL eN 1215, MIDEL eN 1204 | - 7 - |
| 1.3.3 BIOTEMP | - 8 - |
| 1.3.4 ENVITRAFOL | - 8 - |
| 2 Nanokapalina jako izolační médium | - 10 - |
| 2.1 Metody přípravy nanokapaliny | - 11 - |
| 2.1.1 Single step metoda | - 11 - |
| 2.1.2 Two step metoda | - 14 - |
| 2.2 Stabilizace nanokapalin | - 17 - |
| 2.2.1 Elektrostatická stabilizace | - 17 - |
| 2.2.2 Stérická stabilizace | - 18 - |
| 2.2.3 Porovnání elektrostatické a stérické stabilizace | - 19 - |
| 2.3 Současný vývoj v oblasti nanokapalin na bázi přírodních esterů | - 19 - |
| 2.3.1 Nanokapalina s BN nanočásticemi | - 20 - |
| 2.3.2 Nanokapalina s TiO ₂ , ZnO a SiO ₂ nanočásticemi | - 21 - |
| 2.3.3 Materiály AlN a SiN | - 21 - |
| 3 Diagnostika izolačních kapalin a nanokapalin | - 23 - |
| 3.1 Přeskokové napětí | - 23 - |
| 3.2 Zkouška stejnosměrným napětím | - 25 - |
| 3.3 Ztrátový činitel a relativní permitivita | - 26 - |
| 3.4 Vnitřní rezistivita | - 28 - |
| 3.5 Obsah vody | - 29 - |
| 3.6 Číslo kyselosti | - 30 - |
| 3.7 Dynamická viskozita | - 31 - |

| | | |
|-------|---|--------|
| 3.8 | Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací | - 32 - |
| 3.9 | Bod vzplanutí, hoření a tuhnutí..... | - 34 - |
| 4 | Příprava a diagnostika vlastní izolační nanokapaliny | - 35 - |
| 4.1 | Použité nanočástice | - 35 - |
| 4.2 | Vstupní kapalina – řepkový olej | - 36 - |
| 4.3 | Postup přípravy nanokapaliny..... | - 38 - |
| 4.4 | Měřené parametry | - 39 - |
| 4.4.1 | Přeskokové napětí | - 39 - |
| 4.4.2 | Ztrátový činitel a relativní permitivita..... | - 41 - |
| 4.4.3 | Vnitřní rezistivita | - 44 - |
| 4.4.4 | FTIR analýza vzorku SiO ₂ | - 45 - |
| 4.5 | Zhodnocení praktické části | - 46 - |
| | Zhodnocení a závěr | - 48 - |
| | Literatura..... | - 49 - |
| | Přílohy | I |

Seznam symbolů a zkratek

| Značka | Popisek | Jednotka |
|---------------|---|-----------------|
| ϵ_r | Relativní permitivita | [-] |
| $\tan \delta$ | Ztrátový činitel | [-] |
| U_p | Přeskokové napětí | [kV] |
| n | Počet jednotlivých přeskoků | [-] |
| s | Směrodatná odchylka | [-] |
| v | Variační koeficient | [-] |
| C_x | Neznámá měřená kapacita | [pF] |
| C_e | Elektrodová konstanta | [pF] |
| C_0 | Kapacita elektrodové soustavy plněné vzduchem | [pF] |
| C_n | Kapacita elektrodové soustavy plněné kalibrační kapalinou | [pF] |
| ϵ_n | Relativní permitivita kalibrační kapaliny | [-] |
| ϵ_0 | Permitivita vakua | [F/m] |
| C_g | Korelační kapacita | [pF] |
| ρ_v | Objemová rezistivita | [Ω m] |
| K | Konstanta měřicí buňky | [m] |
| <i>FTIR</i> | Infračervená spektroskopie s Fourierovo transformací | |
| <i>ATR</i> | Transmise a totální tlumený odraz (měřicí metoda) | |
| <i>PWE</i> | Pulzní odpařování drátu (pulse wire evaporation) | |
| <i>TEM</i> | Transmisní elektronový mikroskop | |

Úvod

Ústředním bodem této práce jsou biodegradabilní elektroizolační kapaliny, které jsou základem pro později zmíněné nanokapaliny. Je zde popsán jejich historický vývoj a motivace k jejich zavedení. Mezi jejich jasné výhody patří biodegradabilita a obnovitelnost, přičemž disponují ještě vysokou požární bezpečností oproti jejich minerálním protějškům. Dále jsou uvedeny komerčně dostupné biodegradabilní elektroizolační nanokapaliny, jako je Envirotemp FR3, MIDEL, BIOTEMP nebo Fakultou elektrotechnickou v Plzni vyvinutý ENVITRAFOL.

Po objasnění problematiky biodegradabilních elektroizolačních kapalin se záměr práce přesouvá k nanokapalinám, konkrétně k metodám jejich přípravy. Jsou zde uvedeny dva hlavní typy, závisející na počtu kroků přípravy – single step metoda a two step metoda, jejich výhody, nevýhody a použitelnost v rámci přípravy nanokapaliny. Jako zajímavá problematika je zde nastíněná stabilita nanokapalin, která je v současné době jejich největším zápor. Je zde popsána elektrostatická a stérická stabilizace a jejich vhodnost v oblasti elektroizolačních nanokapalin. Nakonec této části je provedena krátká rešerše na současný vývoj v oblasti nanokapalin a výběru vhodného materiálu pro jejich výrobu.

Jsou zde popsány možnosti diagnostiky izolačních kapalin vztažené k dostupným normám, spíše, než na teorii jevů je tato část zaměřená na samotné praktické měření a jakým způsobem by mělo být prováděno. Jsou zde definovány metody měření dielektrických i fyzikálně-chemických parametrů. Dále je zde uveden předpokládaný vliv nanočástic na dané parametry.

V praktické části práce je připraveno několik vzorků nanokapalin s rozličnými nanočásticemi. Je zde popsána metoda přípravy a použité přístroje, jejich následná diagnostika a vyhodnocení naměřených dat. Také je provedena komplexní charakterizace vstupního oleje.

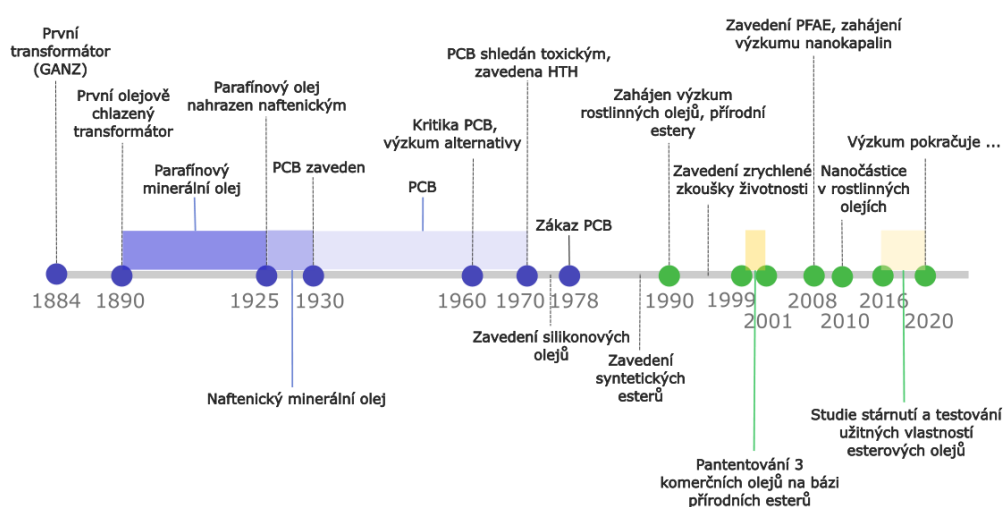
1 Biodegradabilní elektroizolační kapaliny

Minerální oleje na bázi ropy se od roku 1890 hojně používají jako izolační kapaliny díky svým dobrým dielektrickým vlastnostem a příznivé ceně. Minerální olej je ale neobnovitelným zdrojem a jeho vhodnost jako chladicí médium a izolant v transformátorech byla přehodnocena. [1] Mezi hlavní důvody patří jeho rafinace z neobnovitelných zdrojů, nízká teplota vzplanutí a jeho nepříznivý vliv na životní prostředí. V důsledku toho vznikla poptávka po alternativních biologicky odbouratelných dielektrických kapalinách z obnovitelných zdrojů, jako jsou například přírodní estery. Jedná se o izolační kapaliny na rostlinné bázi, netoxické pro životní prostředí a zajišťující dobrou požární bezpečnost.

Součástí této kapitoly je také historický kontext, který ilustruje průběžný vývoj a změny elektroizolačních kapalin. Za průběh používání olejem chlazených transformátorů bylo používáno několik typů elektroizolačních kapalin, přičemž každá měla a má své nedostatky. Zvýrazňuje to tak motivaci k vývoji a používání biologicky odbouratelných esterových kapalin.

1.1 Historický kontext

V průběhu let se v transformátorech používaly různé druhy izolačních kapalin, které za své doby splňovaly dielektrické požadavky izolačních systémů transformátorů a vyhovovaly předpisům na ochranu životního prostředí. Vývoj izolačních kapalin od počátku výroby transformátorů až po rok 2020 je shrnut na obrázku 1.



Obrázek 1: Vývoj izolačních kapalin od počátku technologie transformátorů až po rok 2020[2]

Od začátku výroby olejových transformátorů v roce 1890 se pro účely izolace a chlazení používaly minerální izolační oleje (deriváty ropy). Minerální oleje se získávají buď z parafinové nebo naftenické ropy. Až do roku 1925 se používaly minerální parafinické izolační oleje, které byly nahrazeny oleji na bázi naftenu. Minerální parafinické oleje disponovaly vysokým bodem tuhnutí (okolo $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$). [3] Bod tuhnutí může být definován jako nejnižší teplota, při které zůstává kapalina stále tekutá. Je to důležitý parametr, který je třeba zohlednit v případě, že by byl transformátor provozován v místech s nízkou ambientní teplotou. Nízká tekutost kapaliny vede k horšímu odvodu tepla. [4] Přestože se převážně používaly minerální oleje, jejich nízká požární odolnost (nízká teplota vzplanutí a teplota hoření) způsobovala problémy v místech, kde byly vyžadovány vysoké standardy požární bezpečnosti a motivovala k hledání alternativy. [2], [5], [6]

V roce 1930 bylo zjištěno, že PCB (izolační kapalina na bázi polychlorovaných bifenyly) disponuje vysokou požární odolností a lepšími dielektrickými vlastnostmi než doposud používané minerální oleje. Až do 60. let 20. století se PCB používaly jako izolační kapalina v transformátorech. Objevily se ale závažné problémy dopadu PCB na životní prostředí a lidský organismus a v 70. letech se veřejnost začala stavět proti jejich používání. Bylo také dokázáno, že PCB mají za určitých podmínek spalování nebezpečné emise. V roce 1978 regulační komise zakázaly používání PCB kvůli jejich toxicitě. V Evropské unii měla být zařízení obsahující více než 50 ppm PCB zničena do konce roku 2009. [2], [5], [6]

Zákaz PCB a jejich toxicita zvýšila zájem průmyslu po ekologicky šetrných izolačních kapalinách. Možnou alternativou k PCB jsou vysokoteplotní uhlovodíky (high temperature hydrocarbons – HTH). Tyto kapaliny jsou chemicky podobné běžným minerálním olejům na bázi ropy, mají ale vyšší teploty varu a vyšší molekulové hmotnosti, tudíž mnohem vyšší teploty hoření. Disponují ale větší viskozitou, což zásadně snižuje jejich schopnost vést teplo, jejich použití bylo velmi limitované. [2], [5], [6]

V roce 1970 byly zavedeny silikonové oleje, které nahradily PCB díky svým dobrým tepelným vlastnostem a nezávadnosti, jejich vysoká cena ale omezila použití pouze na některé speciální transformátorové aplikace. [2], [5], [6]

Syntetické estery – syntetizovány z alkoholů a kyselin, byly zavedeny v 90. letech 20. století. Syntetické estery mají vysokou dielektrickou pevnost, jsou biologicky odbouratelné, méně viskózní a mají vyšší teplotu hoření. Současně v důsledku přísnějších ekologických předpisů a zájmu o ekologické technologie začali výzkumníci v 90. letech 20. století zkoumat rostlinné oleje a přírodní estery. V letech 1999 a 2001 byly patentovány tři komerční výrobky pro použití v transformátorech na bázi různých rostlinných olejů

(slunečnicový olej, řepkový olej, sójový olej). V roce 1999 byla patentována elektroizolační kapalina ze slunečnicového nebo řepkového oleje s vysokým obsahem kyseliny olejové, vyvinutá společností ABB. Stala se tak prvním rostlinným olejem pro transformátory na trhu pod obchodním názvem *BIOTEMP*. O rok později vyvinula společnost Cooper Industries Inc. dielektrickou kapalinu z rostlinného oleje, která vznikla čištěním přírodního sójového oleje pod názvem *Envirotemp FR3*. Ve stejné době firma Waverly Light & Power (WL&P) oznámila uvedení svého rostlinného izolačního oleje získaného ze sójového oleje-*BioTrans*. [2], [5], [6]

V letech 2008 a 2012 byly zkoumány oleje z esterů palmových mastných kyselin (palm fatty acid esters – PFAE) pro jejich nízkou viskozitu a vysokou relativní permitivitu. Dále jsou fyzikální vlastnosti esterového oleje a jeho dielektrické a chladicí schopnosti modifikovány disperzací nanočástic. [2]

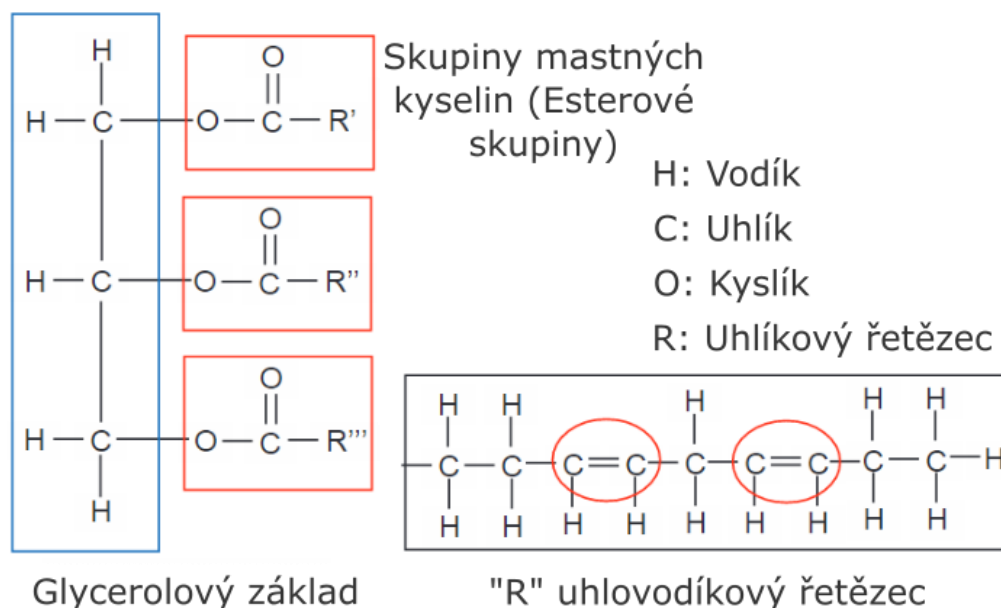
1.2 Přírodní estery jako izolační kapaliny

V současnosti se klade důraz na používání přírodních esterů díky jejich biodegradabilitě a tepelné odolnosti. Minerální olej má řadu nevýhod, jako je špatná biologická odbouratelnost, jeho rafinaci z neobnovitelných zdrojů a nízkou teplotu vzplanutí. Naproti tomu přírodní estery, které jsou 100 % biologicky odbouratelné, patří mezi kapaliny s vyšší požární bezpečností (vyšší teplota vzplanutí a teplota hoření) ve srovnání s minerálními oleji. Teplota vzplanutí je nejnižší teplota, při které se vytvoří nad hladinou hořlavé kapaliny páry, které při kontaktu se vzduchem a plamenem, vzplanou a hned se uhasí. Teplota hoření (vznícení) je nejnižší teplota, při které se směs par nebo plynů dané látky se vzduchem vznítí, tedy začne hořet. [7], [8]

Přírodní estery se získávají z obnovitelných zdrojů – semen různých rostlin, jako je například Řepka olejná (*Brassica napus*) [9], Sója luštěinatá (*Glycine max*) [10] nebo Slunečnice roční (*Helianthus annuus*) [11]. Dále je vzdálenost oddělení transformátoru s biologicky odbouratelným olejem od ostatních transformátorů nebo budov pouze 1/10 vzdálenosti transformátorů na bázi minerálního oleje, což podporuje jeho použití ve vysoce obydlených oblastech. [8], [12]

Další výhodou použití esteru je jeho schopnost absorbovat větší množství vody, než dokáže minerální olej, což umožňuje sušší dielektrický papír v transformátoru. Tento jev má příznivý vliv na životnost transformátoru. Voda má značný vliv na zhoršení elektroizolačních vlastností izolantů, zejména na elektrickou pevnost. Do kapalin se voda dostává převážně z ovzduší nebo je produktem oxidačního stárnutí. [13], [14]

Přírodní estery se mohou vyskytovat buď jako nasycené mastné kyseliny anebo jednoduché, dvojitě nebo trojitě nenasycené mastné kyseliny. Obecná struktura přírodních esterů je založena na glycerolovém základu, na který jsou vázány 3 přirozeně se vyskytující mastné kyseliny, jak je znázorněno na obrázku 2. Rostliny produkují tyto estery jako součást svého přirozeného růstového cyklu a obsahují různé množství dvojných vazeb v řetězci mastných kyselin (R'). [15]



Obrázek 2: Příklady chemické struktury přírodního kapalného esteru [15]

V případě esteru, kde jsou všechny kovalentní vazby v uhlovodíkovém řetězci „R“ jednoduché, je kapalina nasycená a vysoce odolná vůči oxidaci. Pokud jsou přítomny dvojně vazby, vyskytuje se zde riziko porušení těchto vazeb při reakci s kyslíkem, snižující oxidační stabilitu oleje. Kapaliny, které obsahují tyto dvojně vazby, se proto označují jako nenasycené a potřebují určitý stupeň chemické stabilizace. Stejně jako minerální oleje vyžadují inhibitory, vyžadují dielektrika z přírodních esterů antioxidační stabilizátory. Účelem inhibitoru nebo antioxidačního stabilizátoru je zabránit reakci kyslíku s olejem, čímž se zpomalí stárnutí oleje a tím i pevné izolace. I přes inkluzi antioxidačního stabilizátoru by tyto oleje měly být používány v hermeticky uzavřených systémech, kde nebude docházet k přímému působení vzduchu. [15], [16]

Přírodní estery se rozdělují podle stupně nasycení. Stupně nasycení se dělí na mono-, di- a tri- nenasycené složky, které nesou také názvy olejová ($C_{18}H_{34}O_2$) [17], linolová ($C_{18}H_{32}O_2$) [18] a linolenová ($C_{18}H_{30}O_2$) [19]. Řepkový olej má vyšší podíl olejové

(mono-nenasycené) složky, je tím pádem méně náchylný k oxidaci. Čím vyšší je obsah nenasycených mastných kyselin, tím vyšší je bod tuhnutí kapaliny, což může omezit provozní teplotu transformátoru. Použitím určitých látek snižujících bod tuhnutí lze však zlepšit bod tuhnutí u esterových kapalin. [15]

Nasycenost esterů také ovlivňuje permitivitu. S rostoucím stupněm nenasycení se zvyšuje hodnota permitivity. Toto zvýšení ale není na tolik významné, aby jakkoliv ovlivňovalo aplikace pro transformátory. [20]

Estery přírodního původu mají několik nevýhod, které zpomalují jejich expanzi jako alternativu k minerálním olejům. Viskozita esterů je obvykle vyšší než viskozita minerálních olejů, jejich průtok chladicími kanály transformátoru je proto pomalejší a teploty dosahované v transformátoru jsou vyšší. Odhaduje se, že transformátory plněné estery pracují při vyšších teplotách (o 1 až 3 °C) než podobné jednotky na bázi minerálních olejů. Kromě toho je rychlost oxidace esterů vyšší, což je činí vhodnějšími pro hermeticky uzavřené jednotky. Další z nepříznivých charakteristik je jejich vysoký bod tuhnutí, což znamená, že nejsou vhodné pro venkovní transformátory v chladných zónách, pokud nejsou přijata určitá opatření. Možná eliminace nebo zlepšení těchto nepříznivých vlastností leží v dopování těchto olejů nanočásticemi nebo modifikace molekulární struktury esterů. [13]

1.3 Komerčně dostupné biodegradabilní elektroizolační kapaliny

I přes nevýhody esterů byly patentovány a úspěšně komerčně rozšířeny elektroizolační kapaliny na jejich bázi. Zde jsou zmíněny čtyři hlavní zástupci: Envirotemp FR3, MIDEL eN 1215, MIDEL eN 1204 a BIOTEMP. Dále je zde zmíněn olej vyvinutý na Fakultě elektrotechnické v Plzni, ENVITRAFOL. Jsou zde uvedeny základní charakteristické dielektrické a fyzikálně – chemické vlastnosti zmíněných izolačních kapalin. Jedná se o plně biologicky odbouratelné, komerčně dostupné elektroizolační kapaliny na bázi přírodních esterů.

1.3.1 Envirotemp FR3

Kapalina Envirotemp FR3 je vyrobena z 95 % z řepkového oleje spolu s přísadami zvyšujícími výkonost. Používá se v transformátorech výkonové a distribuční třídy jako izolační kapalina a chladicí kapalina. Má vynikající vlastnosti, jako je vysoký bod vzplanutí a bod hoření (330 a 360 °C), dobré elektrické, chemické a ekologické vlastnosti. Neobsahuje silikony, ropu, korozivní síru ani halogeny. Envirotemp je netoxický a zcela biologicky odbouratelný. Je kompatibilní se současnou konstrukcí a materiály v transformátorech.

Jedna ze zásadních nevýhod je jeho bod tuhnutí, který se pohybuje už okolo -18 až -23 °C. I přes to se jedná o méně hořlavou izolační kapalinu v porovnání s minerálním olejem. [8], [21], [22]

Tabulka 1: Charakteristické vlastnosti Envirotemp FR3, převzato z [21]

| Vlastnosti | Envirotemp FR3 |
|--|----------------|
| Teplota vzplanutí (°C) | 320 až 330 |
| Teplota hoření (°C) | 350 až 360 |
| Teplota tuhnutí (°C) | - 18 až -23 |
| Viskozita při 40 °C (mm ² /s) | 32 až 34 |
| Přeskokové napětí 2,5 mm (kV) | 73 |
| Ztrátový činitel při 25 (°C) | 0,0001 |
| Ztrátový činitel při 100 (°C) | 0,0041 |
| Obsah vody (mg/kg) | 4–50 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | 0,013 - 0,042 |

1.3.2 MIDEL eN 1215, MIDEL eN 1204

Jako možná alternativa k minerálním a silikonovým olejům jsou oleje MIDEL eN. Oba typy jsou vyrobeny z obnovitelných zdrojů, jsou velmi šetrné k životnímu prostředí a biologicky odbouratelné. MIDEL eN 1204 je vyroben z řepkového oleje, mezitím co MIDEL eN 1215 je ze sójových plodů. Oba oleje mají vysoký bod vzplanutí a hoření (315/350 °C), což je činní méně hořlavé než minerální olej. Mají vysokou odolnost vůči vlhkosti, což umožňuje zvýšení životnosti izolace. To vede k prodloužení životnosti transformátoru. Jednou z výhod oleje MIDEL eN 1204 je jeho nízký bod tuhnutí oproti ostatním esterům, který se pohybuje okolo - 31 °C. MIDEL eN 1215 má bod tuhnutí okolo -18 °C. Materiály, které se používají při výrobě standardních transformátorů plněných minerálním olejem jsou kompatibilní s MIDEL eN 1215 a MIDEL eN 1204. [8], [23]–[25]

Tabulka 2: Charakteristické vlastnosti MIDEL eN olejů, převzato z [24], [25]

| Vlastnosti | MIDEL eN 1204 | MIDEL eN 1215 |
|--|---------------|---------------|
| Teplota vzplanutí (°C) | 315 | 315 |
| Teplota hoření (°C) | 350 | 350 |
| Teplota tuhnutí (°C) | -31 | -18 |
| Viskozita při 40 °C (mm ² /s) | 37 | 32 |
| Přeskokové napětí 2,5 mm (kV) | > 75 | > 75 |
| Ztrátový činitel při 25 (°C) | 0,002 | 0,002 |
| Ztrátový činitel při 100 (°C) | 0,04 | 0,04 |
| Obsah vody (mg/kg) | 50 | 50 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | 0,04 | 0,04 |

1.3.3 BIOTEMP

BIOTEMP je dielektrická izolační kapalina na bázi přírodních esterů, vyrobená ze slunečnicového nebo světlicového oleje s vysokým obsahem kyseliny olejové. Ze své podstaty je snadno biologicky odbouratelný. Nabízí vysokou požární bezpečnost (bod hoření vyšší než 300 °C), významné provozní výhody oproti minerálnímu oleji (biologická odbouratelnost) a lze ho použít jak ve venkovních i vnitřních transformátorech. Minimalizuje znečištění ovzduší, protože při spalování produkuje pouze vodu a oxid uhličitý. BIOTEMP je schopen absorbovat více vody než minerální olej, což napomáhá odvádět vlhkost vznikající při stárnutí izolačního papíru a zvyšuje životnost pevného celulózového izolačního papíru, který je do něj ponořen. [8], [26]

Tabulka 3: Charakteristické vlastnosti BIOTEMP, převzato z [26]

| Vlastnosti | BIOTEMP |
|--|-------------|
| Teplota vzplanutí (°C) | 330 |
| Teplota hoření (°C) | 360 |
| Teplota tuhnutí (°C) | -15 až - 25 |
| Viskozita při 40 °C (mm ² /s) | 45 |
| Přeskokové napětí 2,5 mm (kV) | 45 |
| Ztrátový činitel při 25 (°C) | 0,0015 |
| Ztrátový činitel při 100 (°C) | 0,02 |
| Obsah vody (mg/kg) | 150 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | 0,075 |

1.3.4 ENVITRAFOL

ENVITRAFOL je elektroizolační kapalina na bázi řepkového oleje, která se v současné době doporučuje používat jako izolační kapalina v distribučních transformátorech. Řepkový olej je zástupcem polosuchého rostlinného oleje a získává se lisováním semen řepky. Vysokomolekulární látky se z lisovaného oleje dále odstraňují pomocí kyseliny fosforečné a vody. Řepkový olej byl použit k výrobě ENVITRAFOLU v potravinářské kvalitě. Tento olej byl skladován v 200 litrové nádobě, ze které byl následně čerpán rychlostí 0,5 l/min přes válcovou kolonu, naplněnou sorbentem AluminaCPN. V průběhu celého procesu byl olej zahříván na 60 °C, aby se snížila jeho viskozita, a před návratem do zásobníku byl olej filtrován přes buničinu. Tento proces byl opakován po dobu 24 hodin. Výsledkem tohoto procesu byl modifikovaný řepkový olej – ENVITRAFOL. [27]

Tabulka 4: Charakteristické vlastnosti ENVITRAFOL, převzato z [27]

| Vlastnosti | ENVITRAFOL |
|--|------------|
| Teplota tuhnutí (°C) | -24 |
| Viskozita při 40 °C (mm ² /s) | 35,84 |
| Přeskokové napětí 2,5 mm (kV) | 60,3 |
| Ztrátový činitel při 90 (°C) | 0,00358 |
| Obsah vody (mg/kg) | 45,8 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | 0,011 |

2 Nanokapalina jako izolační médium

Nanokapaliny se vyrábějí smícháním nanočástic (částice menší než 100 nm) se základní kapalinou. Základními kapalinami mohou být například minerální oleje, silikonové oleje, syntetické estery nebo přírodní estery. Nanočástice mohou být vodivé, polovodivé, nevodivé nebo jejich různé směsi (hybridní nanočástice). Nanokapaliny jsou v mnoha ohledech lepší než izolační kapaliny v základním stavu. Dobrá izolační kapalina by měla mít dostatečné a stabilní dielektrické vlastnosti a vysoké schopnosti přenosu tepla. [28]

| Nanočástice | | |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Vodivé | Polovodivé | Nevodivé |
| Fe_3O_4 | TiO_2 | Al_2O_3 |
| Fe_2O_3 | CuO | SiO_2 |
| SiC | Cu_2O | BN |
| Fe_2NiO_4 | CdS | BaTiO_3 |
| ZnO | ZrO_2 | Si_3N_4 |
| | | AlN |

Obrázek 3: Různé typy nanočástic [28]

Dostupná literatura vykazuje, že přidáním nanočástic do izolační kapaliny se zvyšuje hodnota přeskovového napětí a dochází ke zlepšení ztrátového činitele. Schopnost přenosu tepla dielektrických nanokapalin se liší v závislosti na tepelné vodivosti nanočástic přidaných do základní kapaliny. V případě využití vhodné nanočástice je tepelná vodivost vyšší než u základních izolačních kapalin. Přídavek nanočástic do dielektrické kapaliny pozitivně ovlivňuje také fyzikální vlastnosti, jako je bod vzplanutí, bod hoření a bod tuhnutí. Nanokapaliny disponují ale i nevýhodami, které momentálně omezují jejich aplikaci mimo experimentální využití. Jednou z nich je zvýšená viskozita, která negativně ovlivňuje přenos tepla. Tento problém je možno kompenzovat volbou vhodných nanočástic. Dalším z diskutovaných problémů je stabilita nanokapalin. V dlouhodobém měřítku dochází k aglomeraci (shlukování) a sedimentaci (usazování) nanočástic, což má za následek naprostou degradaci všech zmíněných pozitivních vlastností nanokapaliny a také zhoršení dielektrických vlastností celého izolačního systému. Dále jsou také omezené studie o

interakci mezi celulózovou izolací a nanokapalinami. Tuto problematiku je také nutné řešit, co se týče kompatibility a stárnutí transformátoru. [28], [29]

2.1 Metody přípravy nanokapaliny

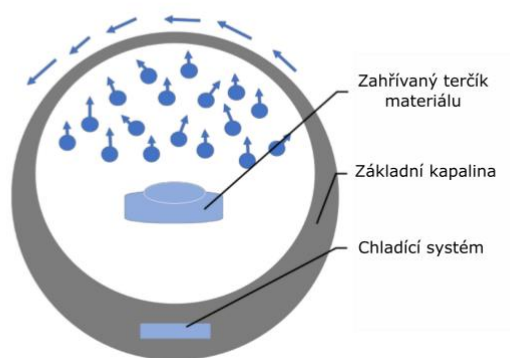
Obecně se v literatuře uvádějí dva základní typy přípravy nanokapalin, kdy každá disponuje určitými výhodami a nevýhodami. Toto rozdělení je klasifikováno podle počtu kroků, nutných pro výrobu nanokapaliny. Jedná se o single-step metodu (metoda obsahující pouze jeden krok) a two-step metodu (metoda obsahující dva kroky). V obou metodách je snaha dosáhnout co nejhomogennějšího a nejstabilnějšího rozmístění nanočástic.

2.1.1 Single step metoda

Při přípravě nanokapaliny pomocí single-step metody se proces přimíchání nanočástic do kapaliny a jejich výroba dějí zároveň. Eliminuje se tím nutnost nanočástice vůbec vlastnit, čímž odpadá jejich skladování, sušení, přeprava nebo složitá dispergace, jako je tomu u two-step metody. Také je zde rovnoměrnější dispergace nanočástic a nedochází k jejich potencionální oxidaci. Zásadní nevýhoda je složitost výrobního procesu. Tento proces je také kompatibilní pouze s kapalinami s nízkým tlakem par. Pro izolační nanokapaliny na bázi olejů se tento způsob přípravy jeví jako nevhodný. [30], [31]

2.1.1.1 Depozice z plynné fáze

Jedna z nejrozšířenějších single-step metod je metoda *depozice z plynné fáze*. Během této metody je malé množství základní kapaliny vířeno na stěně nádoby působením odstředivé síly rotujícího disku. Materiál (například terčik z mědi) je zahříván a odpařen v nádobě naplněné inertním plynem za nízkého tlaku. Nanokapalina je tvořena, když se výpary materiálu kondenzují interakcí s tenkým filmem vířící vody a usazují se v základní kapalině. [31]



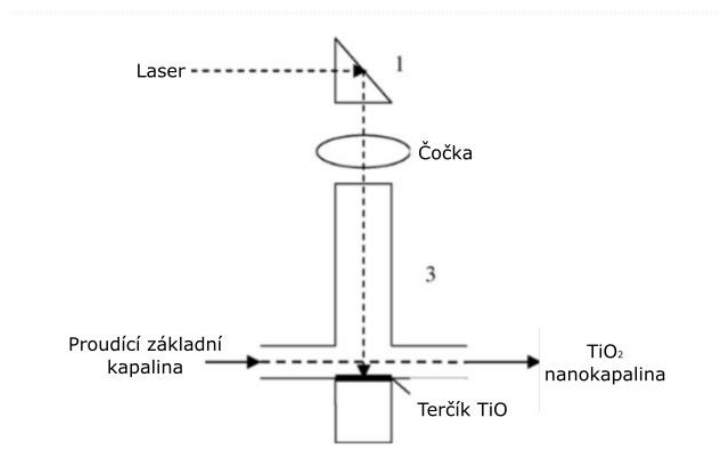
Obrázek 4: Schématické znázornění metody depozice z plynné fáze [31]

Modifikace této metody je takzvané *pulzní odpařování drátu* (*Pulse wire evaporation-PWE*). Používá se převážně pro nanočástice s vyššími teplotami tání. Zařízení, používané na PWE metodu se skládá ze čtyř základních komponentů: Vysokonapěťový stejnosměrný zdroj, kapacitorová banka, odpařovací/kondenzační komora a vysokonapěťový vypínač. V případě [32] byl použit titanový drát (>99,9% čistota, 0,5 mm průměr), který je přiveden do odpařovací/kondenzační komory. Zde je na drát přivedeno vysoké pulzní napětí (25 kV), materiál je následně vypařen v podobě plazmy. Poté se plazma o vysoké teplotě ochladí interakcí se směsí plynů argonu a kyslíku a kondenzuje na částice malých rozměrů. Nanočástice jsou dále kondenzovány kontaktem se základní tekutinou (v tomto případě etylenglykol), která je do komory přiváděna pomocí trysek. Výsledkem je nanokapalina s nanočásticemi, bez jakékoliv povrchové kontaminace.

Množství uvolněných nanočástic je závislé na čase – jak dlouho je drát vystaven napětí. Výsledné nanočástice bývají sférického tvaru. Bylo zaznamenáno použití i jiných kovů pro nanočástice, jako například oxid zinečnatý [33], železo [34], cín [35] a kobalt [36].

2.1.1.2 Laserová ablace

Další z používaných metod je *metoda laserové ablace*. Při této metodě dochází k uvolnění nanočástic z povrchu materiálu ponořeného v základní kapalině pomocí ozáření vysoce zaostřeným laserovým paprskem. Při této metodě je materiál ponořen do proudící základní kapaliny a je ablatován („odtavován“) pulzním laserovým paprskem. Vzniká tak malá oblast (velikost v řádech μm) na rozhraní terče materiálu a proudící kapaliny s vysokou teplotou a vysokým tlakem. V této oblasti se materiál během velmi krátké chvíle zplyní, zionizuje a stane se plazmou. Následně se prudce ochladí vlivem proudící základní kapaliny a kondenzuje, čímž vytváří nanočástice dispergované v základní kapalině. Hloubka ponoření materiálu závisí na intenzitě laseru, vlnové délce, kolik materiálu je nutno uvolnit a také na optických vlastnostech materiálu. Ve článku [37] byla pomocí této metody připravena nanokapalina s nanočásticemi TiO_2 o velikosti >15 nm sférického tvaru, v základní kapalině ethanolu. [31], [37]

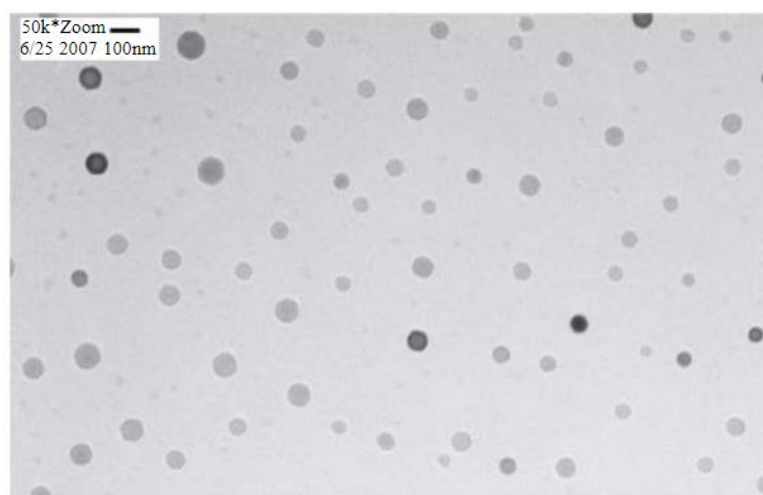


Obrázek 5: Schéma principu laserové ablace [37]

2.1.1.3 Metoda ponořeného oblouku

Při této metodě je materiál, ze kterého budou dispergovány nanočástice, ponořen do základní tekutiny ve vakuové komoře. Generátor elektrického oblouku následně vygeneruje pulzní oblouk v teplotním rozsahu 6 000 až 12 000 °C, který odpařuje materiál spolu s tekutinou. Odpařené částice materiálu se ochlazují a kondenzují ve vakuové komoře. Nanokapaliny připravené touto metodou jsou stabilní a nanočástice jsou dobře rozptýleny v základní tekutině. [31], [38]

V případě článku [38] byla připravena nanokapalina s TiO_2 nanočásticemi v základní kapalině etylenglykolu. Nanočástice byly sférického tvaru. Jejich velikost se dá řídit parametry procesu, konkrétní nastavené parametry měly za výsledek nanočástice o průměrné velikosti 59 nm.

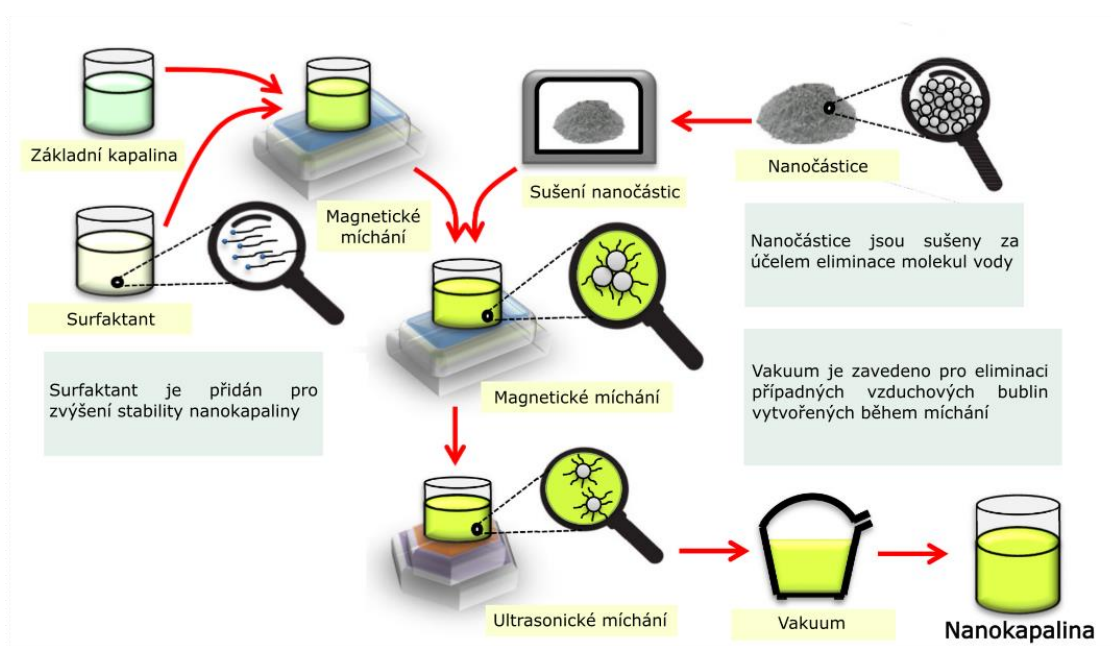


Obrázek 6: Rovnoměrné rozptýlení nanočástic TiO_2 na snímku TEM, převzato z [38]

2.1.2 Two step metoda

Two step proces přípravy se používá při syntéze nanokapalin smícháním základní kapaliny s komerčně dostupnými nanočásticemi. Nanočástice jsou vyráběny různými mechanickými, fyzikálními a chemickými způsoby, jako je mletí, metody sol-gel nebo depozice z plynné fáze. Ke smíchání nanočástic se základní kapalinou je možno použít magnetické míchání spojené s ultrasonickým. Ultrasonické míchání je nutné pro snížení aglomerace (shlukování) částic, které jsou ovlivněny van der Waalsovými silami a také pro homogenní dispergaci. Tyto metody míchání však nejsou dostatečné pro dlouhodobou stabilitu nanokapalin. [28], [30], [31]

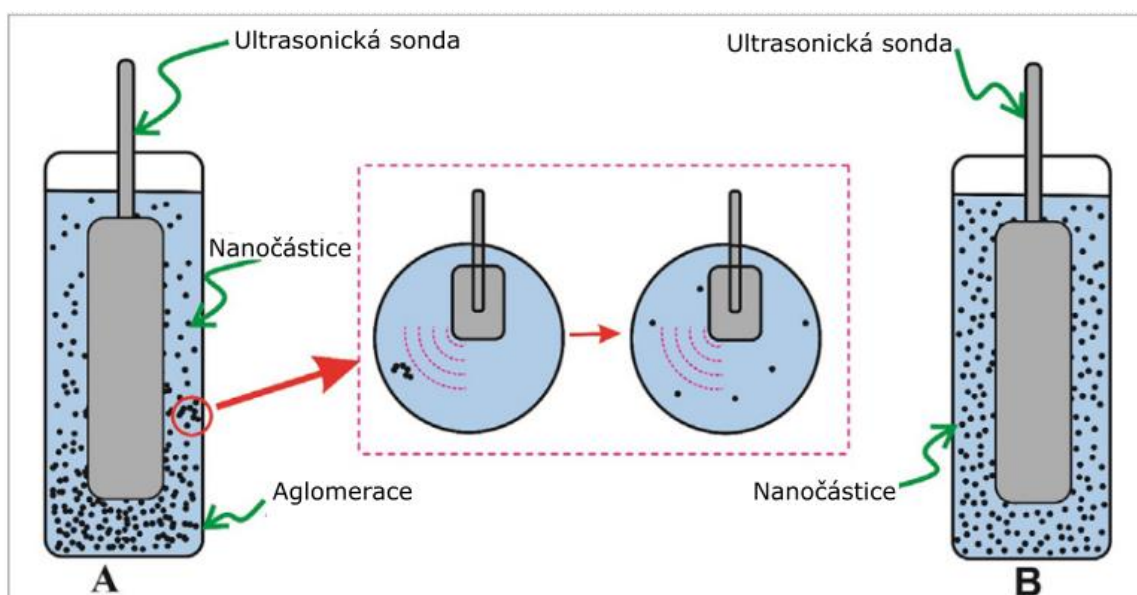
Navzdory těmto nevýhodám je tento proces stále oblíbený pro jeho ekonomičnost a jednoduchost. Nejčastěji používané techniky pro two step metodu jsou: ultrasonikace, magnetické míchání, přidání povrchově aktivní látky a úprava pH. Poslední dvě techniky se většinou používají v kombinaci s prvníma dvěma technikami pro lepší disperzi a stabilitu nanokapalin. Obecné schéma přípravy nanokapaliny pomocí two step metody je na obrázku 7. [39]



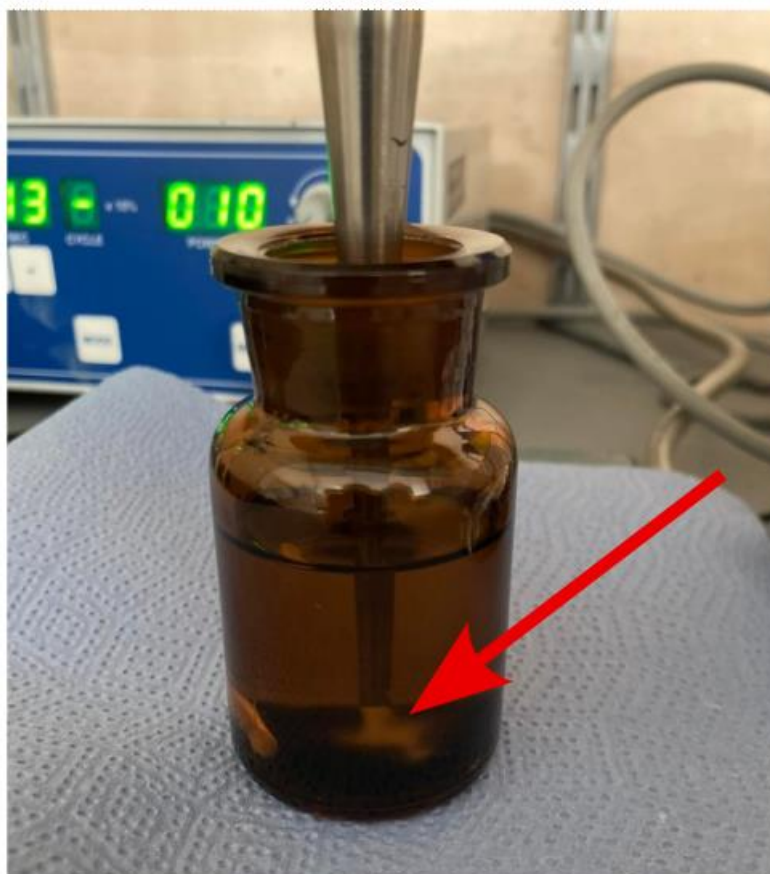
Obrázek 7: Obecné schéma přípravy nanokapaliny pomocí two step metody [28]

2.1.2.1 Ultrasonické míchání

Při této metodě působí ultrasonické vlny o frekvenci $>20\text{kHz}$ na nanočástice v základní kapalině, což snižuje tvorbu shluků přerušením intermolekulárních interakcí. Ultrasonikace je účinná technika ke snížení shlukování nanočástic snížením vazební síly mezi nanočásticemi. Ultrasonické míchání lze provádět buď pomocí sondy nebo zařízení pro ultrasonickou lázeň. Obě techniky/zařízení působí na vzorky ultrazvukem. Existují však značné rozdíly v účinnosti, možnostech procesu a efektivitě. Je známo, že žádoucí účinky ultrazvuku, jako je homogenizace, dispergace a deaglomerace jsou způsobeny kavitací. Kavitace je definována jako tvorba bublin v kapalině v oblastech s nízkým tlakem. Tyto oblasti vznikají v místech, kde byla kapalina urychlena na vysokou rychlost. Tuto oblast lze vidět na obrázku 9, vyskytuje se pod špičkou sondy. V zařízeních s ultrasonickou lázní probíhá kavitace nekontrolovaně a rozloženě. Ultrasonický účinek je nízké intenzity a nerovnoměrně rozložený. V případě ultrasonických sond je ultrasonická zóna přímo pod sondou, takže jsou účinky zařízení intenzivnější a soustředěnější. Proces je plně kontrolovatelný, opakovatelný a intenzita je rovnoměrně rozložená. Z těchto dvou metod je sonikace sondou účinnější a výkonnější než lázeň pro účely disperze nanočástic. [31], [40], [41]



Obrázek 8: Proces ultrasonického míchání [40]



Obrázek 9: Proces ultrasonického míchání v laboratoři FEL

2.1.2.2 Magnetické míchání

Magnetické míchání bývá používáno současně s metodou ultrasonikace během přípravy nanokapalin. Magnetická míchadla využívají k míchání magnetické tyčinky, vlivem magnetického pole rotují. Pohyb této tyčinky důkladně promíchá vzorek rychlým pohybem a mícháním. Tato míchadla by se měla používat se skleněnými nebo jinými nekovovými kádinkami, aby nedocházelo k rušení magnetického pole. [31], [42]

2.1.2.3 Úprava pH

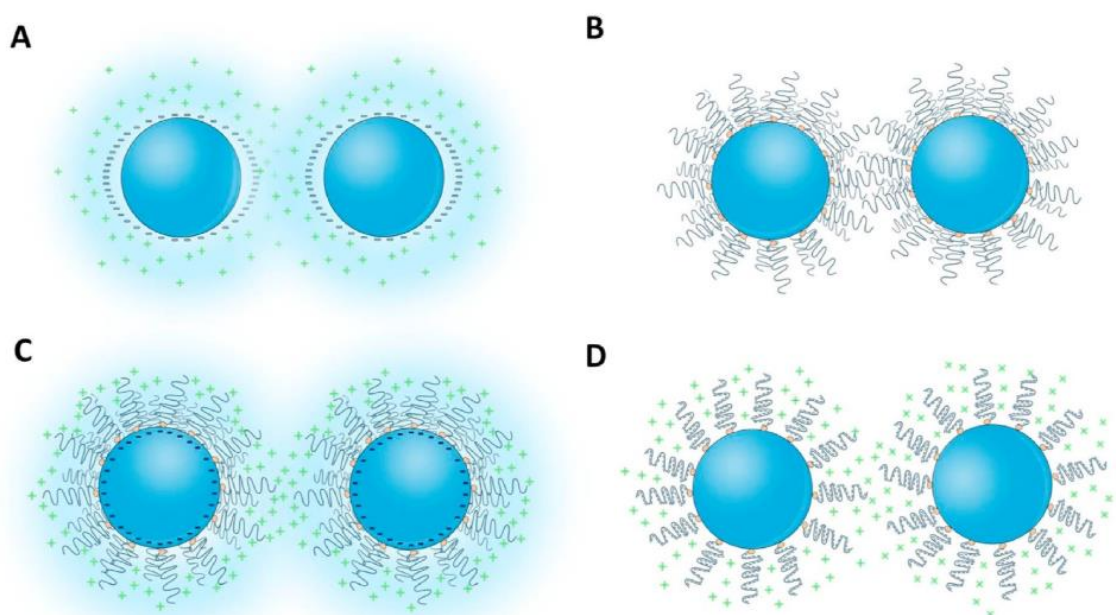
Prostředí disperze lze modifikovat úpravou hodnoty pH základní kapaliny. Tato technika zvyšuje *zeta potenciál* rozptýlených nanočástic. Stabilita nanokapaliny přímo souvisí s hodnotou zeta potenciálu. Nanokapaliny s vyšší hodnotou zeta potenciálu jsou elektricky stabilizované ve srovnání s nanokapalinami s nižší hodnotou. [31]

2.1.2.4 Kombinace metod

Kombinované použití zahrnuje využití kombinace různých procesů, jako je ultrasonické míchání, magnetické míchání a úprava hodnoty pH základní tekutiny k dosažení nanokapalin s lepší stabilitou a dispergací nanočástic. [31]

2.2 Stabilizace nanokapalin

Velkým problémem, jak již bylo nastíněno, je stabilita nanokapaliny. Stabilita může být definována jako schopnost nanokapaliny bránit se průběhům dějů, které vedou ke změně její struktury nebo stupně disperzity. Dispergované částice v nanokapalině vykonávají neustálý tepelný pohyb, při přiblížení na dostatečně blízkou vzdálenost se vlivem přitažlivých sil spojí a vytvoří shluky. K tomuto ději dochází díky coulumbickým silám (působí řádově na desítky nm) a van der Waalsovým mezimolekulárním interakcím (do 1 nm). Tyto síly mají za důsledek spojování částic, a tudíž i přechod soustavy do stavu o nižší disperzitě, a tedy i o nižší energii. Jedním ze způsobů, jak tomuto přechodu zabránit, je vytvoření energetické bariéry kolem jednotlivých částic. Existují tři hlavní způsoby stabilizace: stérická, elektrostatická a kombinace stérické a elektrostatické. Jejich grafické zobrazení je vidět na obrázku 10. [43], [44]



Obrázek 10: Způsoby stabilizace nanokapalin: (A) elektrostatická stabilizace, (B) stérická stabilizace, (C, D) kombinace stérické a elektrostatické, převzato z [44]

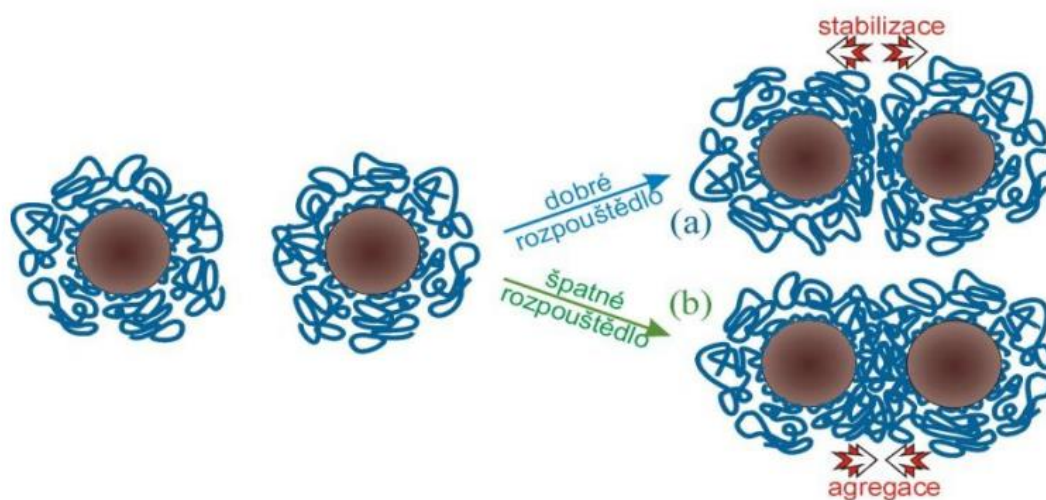
2.2.1 Elektrostatická stabilizace

Jedním ze způsobů, jak zabránit aglomeraci částic je stabilizace elektrickou dvojrůstvou. Tento typ stabilizace se používá obzvláště ve vodných systémech. Při elektrostatické stabilizaci jsou nanočástice nabitě stejnou polaritou, což vytváří mezi nanočásticemi elektrostatickou odpudivou sílu. Odpudivý potenciál se zvyšuje s vyšší relativní permitivitou disperzního prostředí. V případě, že jsou od sebe částice vzdáleny na velké vzdálenosti, povrchy se navzájem neovlivňují. [43], [44]

Teorie, popisující vlastnosti difúzní vrstvy je známá pod zkratkou DLVO (pojmenováno podle autorů – Deryagin, Landau, Verwey, Overbeek). Ve zkratce říká, že celková interakce mezi elektrostaticky stabilizovanými částicemi je kombinací van der Waalsovy přitažlivosti a elektrostatického odpuzování. [43], [44]

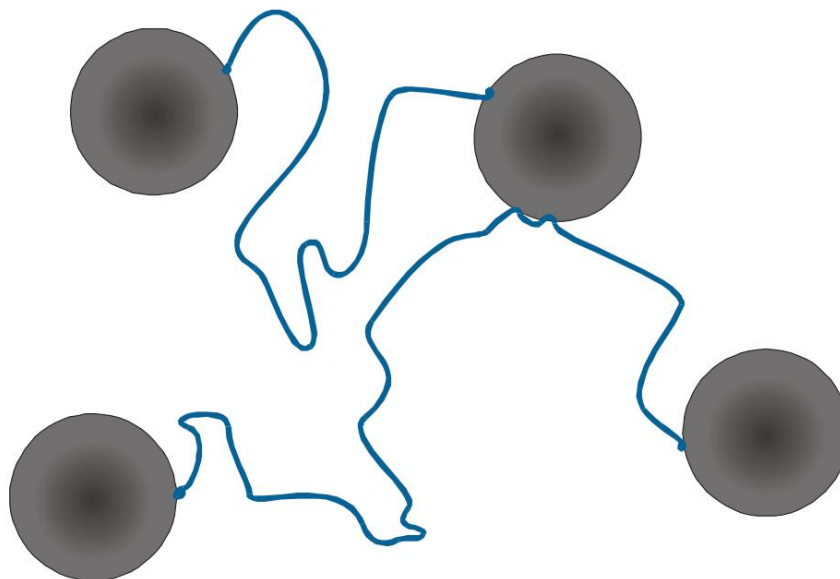
2.2.2 Stérická stabilizace

Sterická stabilizace je dalším široce používaným způsobem stabilizace. Spočívá v připojení makromolekul, typicky polymerních řetězců, na povrch nanočástice jako stérické bariéry, aby se zmírnila van der Waalsova přitažlivost mezi částicemi. Polymerní řetězce mohou být silně vázány na povrch částice chemickou vazbou nebo slabě navázány na povrch částice chemickou nebo fyzikální adsorpcí. Připojené polymerní řetězce by měly mít dobrou kompatibilitu se základní kapalinou, aby sloužila jako dobré rozpouštědlo pro expanzi polymeru. V dobrém rozpouštědle má polymer tendenci expandovat a adsorpční vrstvy makromolekul se vzájemnému pronikání brání. To brání dalšímu přibližování částic a tím i shlukování. Naopak ve špatných rozpouštědlech, adsorpční vrstvy samovolně pronikají a částice se shlukují. Tento jev lze vidět na obrázku 11. [43], [44]



Obrázek 11: Rozdíl mezi dobrým a špatným rozpouštědlem během použití stérické stabilizace, převzato z [43]

Vztah polymeru k rozpouštědлу se může měnit s teplotou nebo přidávkem dalších látek a tím se mění i stabilizační účinek polymeru. Při velmi vysokých molárních hmotnostech polymeru se však může dlouhá makromolekula současně adsorbovat na povrchu několika částic, a tak je k sobě přitahovat, jak lze vidět na obrázku 12. [43]



Obrázek 12: Příklad zvolení příliš velké molární hmotnosti polymeru, převzato z [43]

Stérickou a elektrostatickou stabilizaci lze kombinovat pro stabilizaci disperze nanočástic. Tato kombinace se označuje jako elektrostérická stabilizace. V tomto případě jsou polymerní řetězce navázány na nabitě povrchy částic (obr. 10, 2 C) nebo jsou polyelektrolytové řetězce (obr. 10, 2 D) navázány na nenabitě povrchy částic. Když se k sobě přiblíží dvě částice s modifikovaným povrchem, přispěje elektrostatická i stérická stabilizace k zabránění aglomerace. [44]

2.2.3 Porovnání elektrostatické a stérické stabilizace

Stérická stabilizace je pro využití v izolačních nanokapalinách vhodnější než stabilizace elektrostatická. Stérická stabilizace je účinná jak u roztoků na vodní bázi, tak u organických roztoků, při nízkých i vysokých koncentracích disperzního podílu. Při ochlazení na teplotu tuhnutí a následné ohřátí u elektrostaticky stabilizovaných roztoků dochází k jejich shlukování, stéricky stabilizované roztoky tyto změny snášejí lépe. Jednou z dalších podstatných výhod je možnost využití většího množství nanočástic v nanokapalině a jejich zpětná redispersgace v případě shlukování. Stérická stabilizace také není citlivá na přítomnost elektrolytu. Stabilita roztoků zajišťovaná pouze elektrickou dvojvrstvou může být snadno narušena i malými změnami ve složení disperzního prostředí. [43]

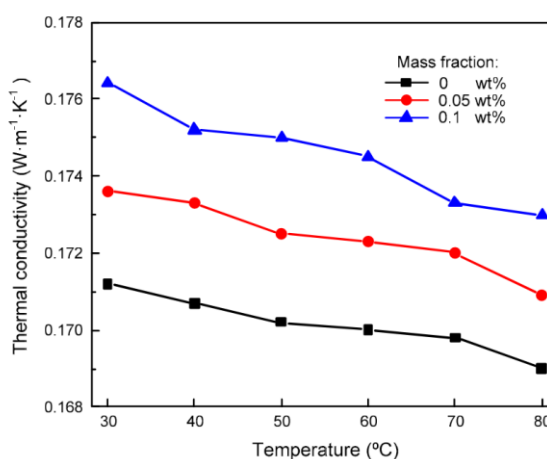
2.3 Současný vývoj v oblasti nanokapalin na bázi přírodních esterů

V rámci přípravy na praktickou část diplomové práce byla provedena krátká rešerše na vhodné nanočástice pro přimíchání do oleje. Na základě této rešerše byly zvoleny nanočástice z nitridu křemíku (SiN), nitridu boru (BN), oxidu křemičitého (SiO₂), oxidu

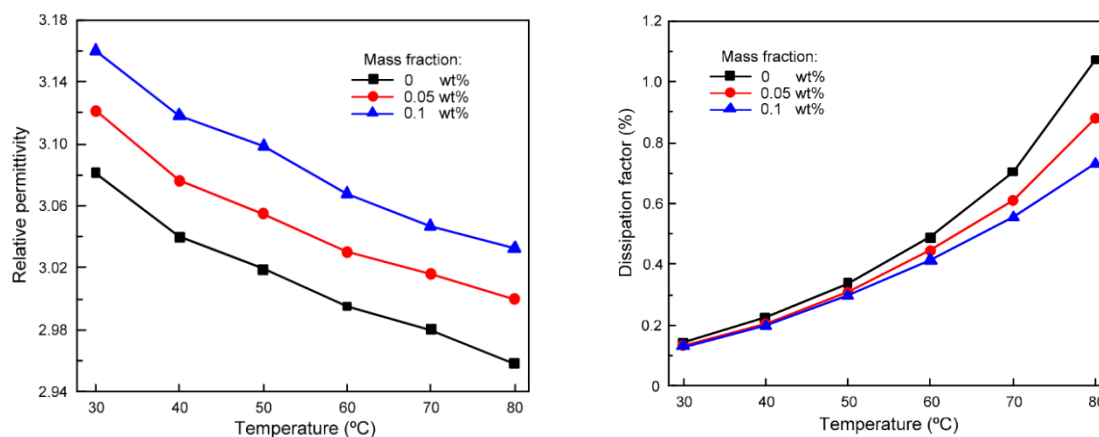
zinečnatého (ZnO) a oxidu titaničitého (TiO₂). Všechny zmíněné články pracovaly s olejem na bázi přírodního esteru. V případě AlN a SiN nebyly nalezeny články, které by nanočástice používaly jako složku do izolační nanokapaliny. Tyto nanočástice byly zvoleny na základě jejich vlastností.

2.3.1 Nanokapalina s BN nanočásticemi

V článku [45] byly použity nanočástice nitridu boru (0,05 a 0,1 % wt hmotnostního zlomku) o velikosti 50 nm a čistotě 99 %. Tyto nanočástice byly rozmíchány v přírodním esterovém oleji pomocí magnetického míchání po dobu 40 minut a ultrasonického míchání také po dobu 40 minut při 40 °C. Poté byl olej podroben vakuu a vysušen. Po namíchání nanokapaliny bylo změřeno přeskové napětí, ztrátový činitel, relativní permitivita a byla kvantifikována tepelná vodivost.



Obrázek 13: Závislost tepelné vodivosti na teplotě a hmotnostním zlomku nanočástic, převzato z [45]



Obrázek 14: Závislost relativní permitivity (vlevo) a ztrátového činitele (vpravo) na teplotě a hmotnostním zlomku nanočástic, převzato z [45]

Z obrázku 13 je patrné, že nanokapalina disponovala lepšími vlastnostmi v ohledu tepelné vodivosti, kdy byl největší nárůst zaznamenán s 0,1 % wt nanočástic. Relativní permitivita (obrázek 14) byla naopak nejvyšší v přidavkem 0,1 % wt, kdy dosahovala při 80 °C 3,08. Ztrátový činitel (obrázek 14) byl nejnižší s 0,1 % wt přidavkem. Při experimentu se dále povedlo navýšit přeskokové napětí o 30 % a 33 % oproti základnímu čistému oleji. Studie nezmiňuje konkrétněji, jaký typ oleje byl použit, pouze to, že to byl přírodní ester.

2.3.2 Nanokapalina s TiO₂, ZnO a SiO₂ nanočásticemi

Ve článku [27] byly použity nanočástice TiO₂, ZnO a SiO₂ v různých koncentracích (0,05; 0,1; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5 a 1 wt %). Nanočástice byly o velikosti 20 nm, o 99+ čistotě. Jako základní kapalina byl použit olej ENVITRAFOL. Jeho vlastnosti jsou zmíněny v kapitole „1.3.4 ENVITRAFOL“, přičemž jeho přeskokové napětí je 60 kV/2,5 mm. Nanočástice byly vysušeny při 110 °C po dobu 11 hodin. Po vsypání nanočástic do oleje byla nanokapalina byla míchána dvojitým šroubovým míchadlem po dobu jedné hodiny a následně bylo použito 200 W ultrasonikační míchadlo po dobu dvou hodin při frekvenci 40 kHz. Bylo změřeno přeskokové napětí pro jednotlivé nanokapaliny o různých koncentracích. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejlepší vlastnosti byly v rozmezí mezi 0,2 a 0,3 % wt v závislosti na typu nanočástice. Zlepšení v přeskokovém napětí lze vidět v tabulce 5.

Tabulka 5: Přeskokové napětí různých typů nanokapalin, převzato z [27]

| | Přeskokové napětí (kV/2,5 mm) | Hmotnostní zlomek | Zlepšení (%) |
|------------------|----------------------------------|-------------------|--------------|
| TiO ₂ | 75,6 | 0,25 | 26 |
| ZnO | 72 | 0,3 | 20 |
| SiO ₂ | 64,5 | 0,2 | 7,5 |

2.3.3 Materiály AlN a SiN

Nitrid hliníku má hexagonální krystalovou strukturu a je to materiál s kovalentní vazbou. Má vysokou tepelnou vodivost (až 321 W/mK) a je elektrickým izolantem (vysoká vnitřní rezistivita a vysoká dielektrická pevnost). Ve formě prášku je náchylný k hydrolyze vodou nebo vlhkostí. Vykazuje piezoelektrické vlastnosti. Vysoká tepelná vodivost spolu s dielektrickou pevností vede k jeho použití jako substrátu nebo pouzdrění pro vysoce výkonné nebo husté sestavy mikroelektronických součástek. Pro tyto vlastnosti se jevil jako vhodným kandidátem pro nanosložku do praktické části diplomové práce. [46], [47]

Nitrid křemíku je jednou z nejtvrdějších a nejodolnějších keramik. U substrátů SiN byla pozorována vysoká rezistivita, až $10^{14} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ při pokojové teplotě. Materiál vykazuje také vynikající tepelné vlastnosti s minimální teplotní roztažností a schopností odolávat teplotním šokům (rychlým a výrazným změnám teploty), dobrou tepelnou vodivostí (90 W/mK) a stabilitou. Nitrid křemíku má také dobré chemické vlastnosti, včetně stability vůči většině kyselin a zásad a korozivním plynům. Díky těmto vlastnostem se používá jako substrát pro výkonovou elektroniku. Pro tyto charakteristické vlastnosti byl zvolen jako materiál pro nanosložku do izolační nanokapaliny. [48], [49]

3 Diagnostika izolačních kapalin a nanokapalin

Diagnostika kapalných izolantů určuje jejich kvalitu v závislosti na okolních podmínkách, jako je teplota nebo elektrické namáhání. Je tak možné identifikovat případné nečistoty, obsah vody nebo kyselost vzorku, které by měly nepříznivý vliv na samotnou funkci dielektrika v transformátoru.

Obecně měření dielektrických vlastností spadá do tzv. fenomenologického přístupu (nebo také *black box* – černá skříňka), kdy jsou sledovány vnější změny bez ohledu na strukturální změny, které se dějí v dielektriku. Jedná se o měření přeskokového napětí, ztrátového činitele a relativní permitivity a vnitřní rezistivity. [50]

Dále jsou popsány fyzikálně-chemické parametry, jako je číslo kyselosti, obsah vody, dynamická viskozita, bod hoření, vzplanutí a bod tuhnutí. Sledováním čísla kyselosti a obsahu vody je možno určit stárnutí dielektrika.

3.1 Přeskokové napětí

Přeskokové napětí izolačního oleje indikuje jeho schopnost odolávat elektrickému namáhání v elektrických zařízeních. Je to proces zaměřený na identifikaci přítomnosti kontaminantů, jako je například voda, produkty stárnutí nebo plyny. Přeskokové napětí je definováno jako nejmenší naměřené napětí při vzniku prvního výboje mezi elektrodami. Měřený vzorek, umístěný ve vhodném elektrodovém zařízení je vystaven zesilujícímu se střídavému elektrickému poli až do vzniku průrazu za konstantní rychlosti vzrůstajícího napětí. Měření je velmi citlivé, může být ovlivněno mnoha faktory, jako je například čistota nádoby a elektrod, dobou mezi jednotlivými přeskoky, rychlostí náběhu napětí, a i celkovým počtem přeskoků. Špatné umytí nádoby a elektrod může vnést kontaminanty do oleje a s každým přeskokem olej stárne. [14]

Vhodná zkušební komůrka a elektrodový systém musí splňovat několik požadavků. Elektrody musí být semisférického tvaru, vyrobeny buď z mosazi, bronzu nebo z austenitické korozivzdorné oceli. Mezi elektrodami musí být pevná vzdálenost 2,5 mm. Objem zkušební komůrky musí být mezi 350 ml až 600 ml. Musí být vyrobena z izolačního, chemicky netečného materiálu. Příklad vhodného uspořádání na testování elektroizolační pevnosti lze vidět na obrázku 15 a 16. Mezi jednotlivými průrazy by měl být olej promíchán s dobou čekání minimálně 2 minuty. Případně je možné použít i magnetické míchadlo, při rychlosti 250 ot/min. až 300 ot/min. Nárůst napětí se zvyšuje s rychlostí 2,0 kV/s při síťovém kmitočtu. Provádí se 6 přeskoků ze kterých se následně vypočítá průměr v kilovoltech (kV).

$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \quad (1)$$

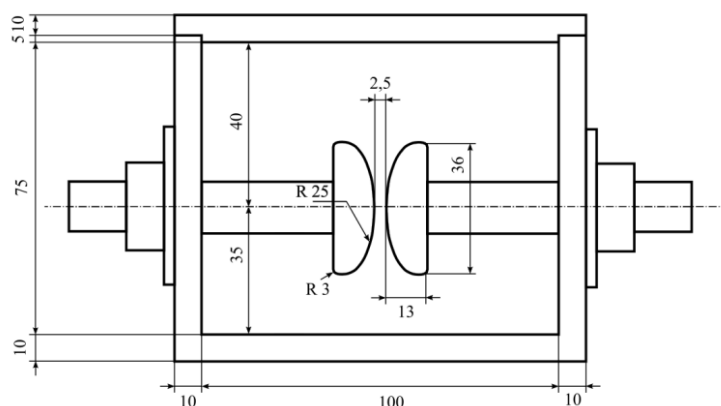
Kde U_{pi} je hodnota napětí jednotlivých přeskoků v kV a n je počet jednotlivých přeskoků. Z těchto hodnot se dále provede statistické zpracování. Vypočítá se směrodatná odchylka (s) a variační koeficient (v).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_p - U_{pi})^2}{n-1}} \quad (2)$$

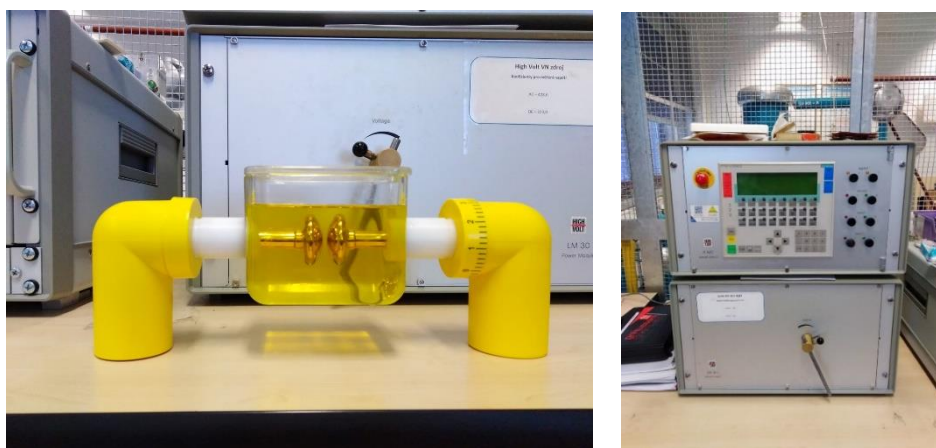
$$v = \frac{s}{U_p} \times 100\% \quad (3)$$

V případě, že variační koeficient vypočítaný z hodnot přeskokového napětí přesahuje 20 %, zkoušky se opakují s izolantem ze stejné várky. Pokud je opět variační koeficient větší než 20 %, izolant nevyhověl. [14]

Měření je podrobněji definováno normou ČSN EN 60156 – Izolační kapaliny – stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu – Zkušební metoda. [14], [51], [52]



Obrázek 15: Příklad vhodného uspořádání na měření elektrické pevnosti olejů, převzato z [14]



Obrázek 16: Příklad elektrodového systému a vysokonapětového zdroje

Přeskokové napětí je důležitým ukazatelem kvality dielektrika. Dopované oleje nanočásticemi mají obecně vyšší přeskokové napětí než čisté oleje, za předpokladu, že je použita správná koncentrace a nanočástice jsou dobře dispergovány. Také úroveň snížení přeskokového napětí za přítomnosti rozpuštěné vody vlivem stárnutí byla v nanokapalinách nižší. Z hlediska dielektrické pevnosti je výhodnější volba menších nanočástic ve vysokých koncentracích než použití větších nanočástic. Při stejné objemové koncentraci mají nanočástice malých rozměrů větší celkový povrch, což jim umožňuje zachytit více volných elektronů. Bez ohledu na jejich velikost zvyšování počtu nanočástic nad určitou koncentraci vlastnosti kapaliny zhoršuje. Nadměrné množství částic zvyšuje aglomeraci a zkracuje dráhy výboje.[28]

3.2 Zkouška stejnosměrným napětím

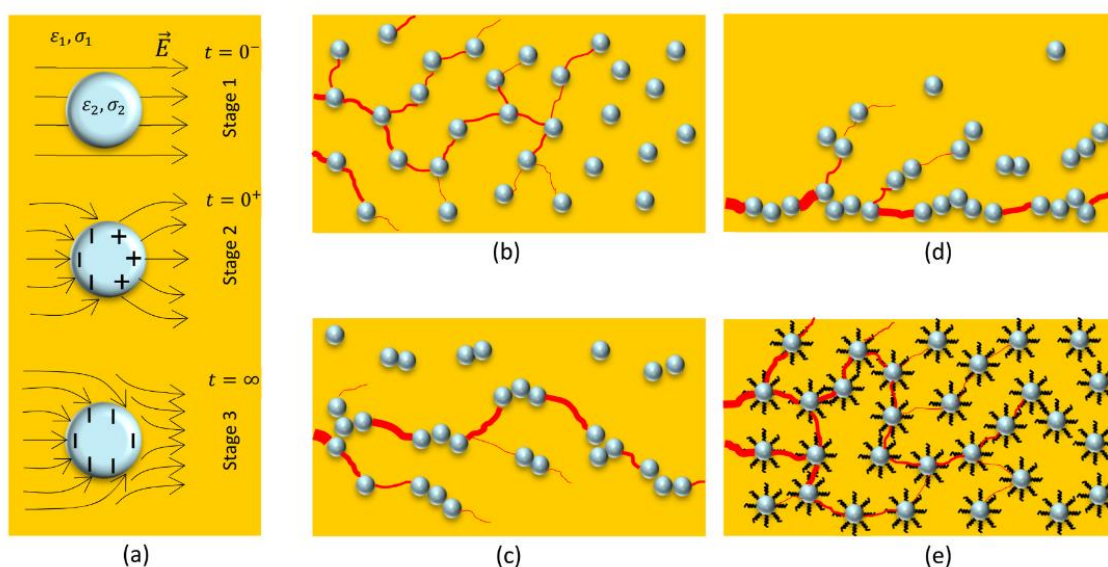
Zkouška stejnosměrným napětím se používá k tomu, aby se ukázalo, jak izolace působí proti rychlému nárůstu napětí v napájecí soustavě, což je stav, který může nastat při vnitřních a vnějších poruchách. Aplikovaný signál je velmi rychlé jednosměrné napětí, jehož velikost může být kladná nebo záporná. [28]

Jev přeskoků v nanokapalině při zkouškách stejnosměrným napětím je popsán na obrázku 17. V čistém oleji vystaveném elektrickému poli jsou siločáry elektrického pole rovnoběžné a homogenní. Když do prostředí vstoupí nanočástice, homogenita elektrického pole se naruší a vnitřní děje v dielektriku se výrazně změní, protože dielektrické vlastnosti materiálů jsou odlišné. Permittivita nanočástic se liší od permitivity oleje a jejich vodivost je ve srovnání se základním olejem velmi vysoká. Vnitřní děje během působení elektrického pole na nanokapalinu jsou vyobrazeny na obrázku 17. V případě jednotlivé nanočástice (a), kde ϵ_1 a ϵ_2 jsou permitivity a σ_1 a σ_2 jsou vodivosti. Siločáry elektrického pole mířící na nanočástici způsobují polarizaci na jejich povrchu, jak je znázorněno ve fázi 2. Kladný povrch polarizované nanočástice má tendenci zachycovat elektrony v prostředí, čímž se nanočástice mění v elektronovou past, snižující rychlost šíření elektronů. V konečné fázi se nanočástice přemění na záporně nabitě nosiče. [28]

Případ b) vyobrazuje homogenně rozptýlené nanočástice v oleji. V takovém případě se elektrony pohybují ke kladnému povrchu nanočástice, který je polarizován elektrickým polem. Verze b) ukazuje jev větvení na dráze náboje. V oleji obsahujícím nanočástice dochází k mnohem většímu větvení než v čistém oleji. Jelikož je počet větví na jednotku objemu vysoký, je každá větev o něco tenčí. [28]

Případy c) a d) popisují průběh náboje při sedimentaci a aglomeraci. K tomuto ději může dojít v případě špatného rozmíchání nebo zvolení příliš vysoké koncentrace nanočástic. Nanočástice v oleji se vzájemně přitahují a v průběhu času aglomerují. Vlivem gravitace také sedimentují. To způsobuje, že se dráha náboje v určitých oblastech „zahušťuje“, jak je znázorněno v případě d) a c). V důsledku toho se dráha náboje zkracuje a přeskokové napětí média klesá. [28]

Poslední případ e) ukazuje že přidání dostatečného množství surfaktantu je možné zajistit stabilitu nanokapaliny, čímž zabrání očekávanému vzniku aglomerace a sedimentace. V tomto případě jsou nanočástice homogenně rozptýleny a dráhy náboje jsou velmi podobné situaci v případě a). [28]



Obrázek 17: Průběh náboje v nanokapalině vystavené elektrickému poli pro různé situace: (a) pro jednotlivé nanočástice v oleji, (b) pro homogenně rozptýlené nanočástice v oleji, (c) pro případ aglomerace v oleji, (d) pro sedimentaci a aglomeraci v oleji (e) pro rozptýlené nanočástice v oleji s užitím surfaktantu [28]

Jedná se o neměřený paramet v praktické části, jeví se ale vhodný pro popis vlivu nanočástic na dielektrické vlastnosti.

3.3 Ztrátový činitel a relativní permitivita

Ztrátový činitel ($\tan \delta$) je jeden z nejdůležitějších ukazatelů kvality dielektrika. Ukazuje míru ztracené energie, která se mění v teplo. Je závislý na teplotě, frekvenci a napětí. Vysoké hodnoty ztrátového činitele mohou indikovat znečištění oleje polárními nečistotami nebo špatnou úroveň rafinace. [14]

Permitivita je schopnost dielektrika se polarizovat. Relativní permitivita je absolutní permitivita vztažena k permitivitě vakua. Je úměrná polarizaci. Charakterizuje vliv prostředí

na intenzitu elektrického pole – namáhání izolace nacházející se v tomto poli. V případě rostlinných olejů se pohybuje v rozmezí 3 až 5, klesá s teplotou. [50]Jedná se o další parametr, který pomáhá určit čistotu oleje. Měření tohoto parametru často probíhá i s měřením ztrátového činitele. [14]

K měření relativní permitivity a ztrátového činitele se využívá elektrodového systému – měřící cely, ve které je umístěn zkoumaný vzorek kapaliny. Cely musí splňovat několik požadavků – musí být konstruována tak, aby šla snadno demontovat a lehko vyčistit, musí umožnit měření teploty, včetně její regulace. Elektrody dále musí mít hladký povrch.

Ztrátový činitel a relativní permitivitu je možné měřit pomocí samovyvažujícího se Scheringova můstku. Střídavé napětí je nastaveno tak, aby vystavovalo kapalinu napěťovému namáhání od 0,03kV/mm až 1kV/mm. Musí mít sinusový průběh a frekvenci od 40 Hz až 62 Hz. Měření by se mělo provádět do 90°C. Aby bylo možné specifikovat ztrátový činitel, je vhodné uvažovat o měřeném objektu jako o kondenzátoru. Měřící buňky (obrázek 18) jsou složeny z kovu a izolace, disponují tedy kapacitními vlastnostmi. Skládají se ze dvou elektrod – kapacitní a napěťové. Bude měřena kapacita izolace mezi těmito elektrodami. Z této kapacity jsme pak schopni vypočítat ztrátový činitel a permitivitu. V případech, že je vyžadováno velmi přesné měření, je požadováno provést kalibraci měřící cely známou kapalinou. Je nutné určit konstantu kapaliny – opravnou kapacitu, kterou dále odečítáme od neznámé kapacity (C_x) měřené kapaliny.

$$C_e = \frac{(C_n - C_0)}{\epsilon_n} \quad (4)$$

Kde C_e je elektrodová konstanta, C_0 je kapacita elektrodové soustavy plněné vzduchem, C_n je kapacita elektrodové soustavy naplněnou kalibrační kapalinou a ϵ_n je známá relativní permitivita kalibrační kapaliny.

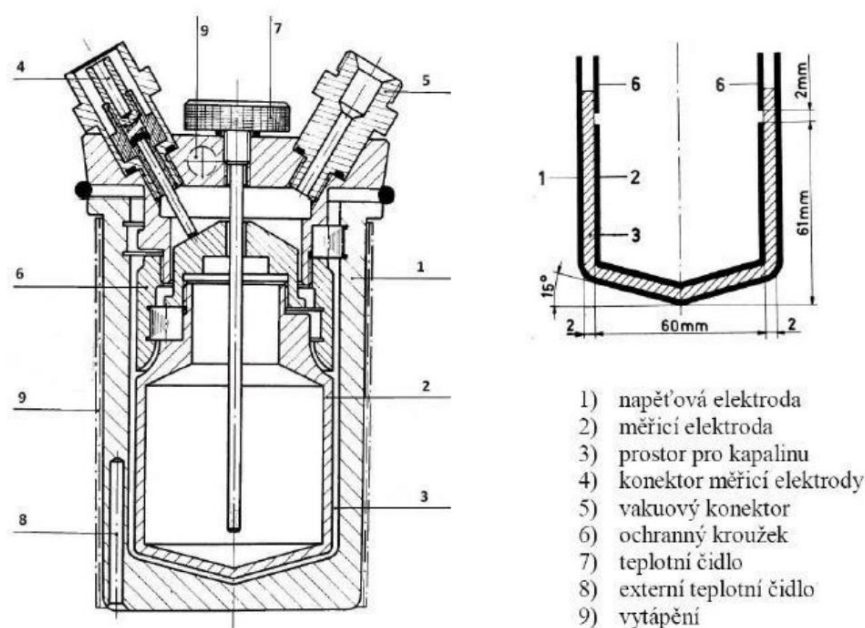
Dále se určí rozdíl hodnot C_0 a C_e , výsledkem je korelační kapacita.

$$C_g = C_0 - C_e \quad (5)$$

Poté se změří kapacita C_x elektrodového systému s měřenou kapalinou, ze které se vypočítá permitivita ϵ_x

$$\epsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_e} \quad (6)$$

Měření je popsáno v normě ČSN EN 60247 – Izolační kapaliny – Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele a rezistivity při stejnosměrném napětí. [14], [52], [53]



Obrázek 18: Elektrodový systém pro měření ztrátového činitele a relativní permitivity, převzato z [54]

U dobré izolační kapaliny se očekává poměrně nízká hodnota ztrátového činitele ($\tan \delta$). V literatuře se lze setkat s rozporupnými výsledky studií provedených na přidávku nanočástic do čistého oleje a vztahu k $\tan \delta$. Většina studií však uvádí, že hodnoty $\tan \delta$ u nanokapalin jsou nižší než u čistého oleje. Musí být opět dodržen vhodný poměr nanočástic ku oleji. Obecně se udává 0,25% hmotnostní koncentrace. [27], [28]

3.4 Vnitřní rezistivita

Elektrická vodivost olejů souvisí s chemickým složením, strukturou a obsahem nečistot a příměsí. Rezistivita je míra odporu materiálu, který klade průtoku elektrického proudu. Nízká rezistivita indikuje materiál, který snadno přenáší elektrický náboj. Závisí na teplotě, elektrickém namáhání a době vystavení napět'ovému namáhání. Se vzrůstající teplotou se snižuje viskozita vzorku, dochází tak ke zvýšení pohyblivosti iontů a koloidních částic, čímž dochází ke snížení rezistivity. Vnitřní rezistivita je poté odpor vzorku přepočítaný na objem izolantu. Odečítá se po první minutě, kdy dojde k ustálení procházejícího proudu vzorkem. [14]

Měření probíhá ve stejném měřicím systému popsaném při měření ztrátového činitele a relativní permitivity.

Rezistivita se měří při stejnosměrném napětí odpovídající napět'ovému namáhání 250 V/mm. Čas namáhání by měl odpovídat 60 (± 2) s. V případě, že byl před

měřením rezistivity měřen i ztrátový činitel a relativní permitivita, je nutné elektrody vyzkratovat po dobu 60 s. Měření teplotní závislosti při různých teplotách by mělo započít až po 10 minutách po dosažení požadované teploty v rozmezí ± 1 °C. Vnitřní elektroda se uzemní a k vnější elektrodě bude přivedeno napětí. Na konci doby přiložení stejnosměrného napětí se odečítá proud a napětí. Elektrodotový systém se poté vyprázdní a naplní novým vzorkem téže várky a celé měření se opakuje. Měření se nesmí lišit o více jak 35 % z nejvyšších naměřených hodnot.

Vypočítá se dle vzorce:

$$\rho_V = K \times \frac{U}{I} \quad (7)$$

Kde ρ_V je rezistivita v ohmmetrech ($\Omega \cdot m$), K je konstanta měřicí buňky v metrech (m), U je stejnosměrné měřicí napětí ve voltech (V) a I je stejnosměrný měřicí proud v ampérech (A).

Konstanta měřicí cely se spočte jako:

$$K = \frac{1}{\varepsilon_0} \times C_0 \quad (8)$$

Kde ε_0 je permitivita vakua ($8,8 \cdot 10^{-12}$ F/m) a C_0 je kapacita (pF) prázdné cely.

Měření je definováno normou ČSN EN 60247 – Izolační kapaliny – Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele a rezistivity při stejnosměrném napětí. [14], [52], [53]

3.5 Obsah vody

Nízký obsah vody v izolačním oleji je nezbytný pro dosažení adekvátního přeskokového napětí a nízkého ztrátového činitele. Voda může vzniknout jako produkt degradace při polykondenzační reakci. Především se však dostává do oleje z vlhkosti okolního prostředí. V oleji se voda vyskytuje v rozpuštěné, emulgované a volné podobě. Přítomnost vody v elektroizolačních kapalinách můžeme kvantifikovat pomocí coulometrické titrační metody podle Karl Fischera. [14]

Titrace je chemická analýza, při níž se stanovuje obsah látky, například vody, přidáváním činidla o známé koncentraci v pečlivě odměřených množstvích, dokud není chemická reakce dokončena (je zajištěna úplná oxidace nebo redukce). Při coulometrické titrační metodě je průběh měření závislý na koncentraci jódu v nádobce, který se tvoří anodickou oxidací. Tato koncentrace je detekovaná pomocí indikační elektrody. Voda reaguje v nádobce s jódem a dalšími složkami měřicího roztoku stechiometricky. Podle stechiometrické reakce jeden mol

jódu reaguje s jedním molem vody, tudíž podle Faradayova zákona elektrolýzy je množství vody úměrné celkovému integrovanému proudu. Časový integrál proudu lze převést na množství vody ve vzorku, jeden mol jódu reaguje s jedním molem vody. Měřicí aparát lze vidět na obrázku 19. Měření toho parametru popisuje norma ČSN EN ISO 12937. [14], [55]



Obrázek 19: Zkušební nádoba pro měření obsahu vody

3.6 Číslo kyselosti

Stárnutím oleje a systému olej-papír se zvyšuje množství kyselých látek obsažených v oleji. Jedná se o vhodný parametr pro posouzení stavu a stáří oleje. Definice čísla kyselosti ho stanovuje jako množství hydroxidu draselného (KOH), které je potřeba v nevodném alkoholickém prostředí k neutralizaci organických a anorganických kyselých složek v 1 g oleje. Pro stanovení čísla kyselosti se využívá metody potenciometrické titrace. [14]

Zařízení se skládá ze skleněné indikační elektrody a referenční elektrody, automatického pH titrátoru, míchadla a titrační nádoby. Měřený vzorek izolačního oleje se rozpustí v rozpouštědle potenciometricky se titruje alkoholovým roztokem za použití skleněné

indikační elektrody a referenční elektrody. Měření je podrobněji vysvětlené v normě ČSN EN IEC 62021-1. [56]

Další z možných postupů je využití alkalické modři 6B. Dle této metody se titrace vzorku rozpuštěného ve směsi alkoholu a toluenu provádí volumetrickou titrací na barevný indikátor, alkalickou modř B6, do změny barvy z modré na červenou nebo u tmavších olejů z modrého odstínu na červený. Při stanoveních čísla kyselosti je využita spektrofotometrická indikace, poskytující signál pro řízení titrace mikroprocesorem. Příklad možného měřicího uspořádání lze vidět na obrázku 20. [57]



Obrázek 20: Coulometer KOH/USB

3.7 Dynamická viskozita

Parametr viskozity je rozhodující pro všechny kapaliny, které mají za úkol chladit. Kapaliny s nízkou viskozitou zajišťují efektivní provoz zařízení, lepší odvod tepla a prodlužují jeho životnost. Kapaliny používané ve výkonových transformátorech přenášejí teplo zejména konvekcí a kondukcí. Parametr viskozity přímo ovlivňuje schopnost kapalin konvektivně přenášet teplo a měl by být co nejnižší. [14]

Dynamická viskozita je síla tření, která vzniká mezi dvěma vrstvami proudící kapaliny, které se stýkají plochou 1 m^2 a rozdíl jejich rychlostí je 1 ms^{-1} . Její měření je možné pomocí vibračního viskozimetru. Vibrační viskozimetr měří viskozitu pomocí detekce elektrického proudu potřebného k rezonanci dvou sensorových desek při konstantní frekvenci 30 Hz a amplitudě menší než 1 mm. [14]



Obrázek 21: Příklad vibračního viskozimetru SV-10

Ačkoli se v literatuře objevují protichůdné studie, většina z nich uvádí, že nanokapaliny mají vyšší viskozitu než oleje v čistém stavu. Přidání nanočástic do oleje se zásadně zvyšuje celková hustota a viskozita média. Za normálních okolností se očekává, že tato situace nepříznivě ovlivní schopnost přenosu tepla. Studie však ukázaly, že tepelná vodivost nanokapalin se zvyšuje v závislosti na vlastnostech nanočástic. Do jisté míry se tyto protichůdné vlastnosti kompenzují. I přes zvýšení hodnoty viskozity jsou nanokapaliny výhodnější než čisté oleje díky svým dobrým dielektrickým vlastnostem. Hodnota viskozity olejů obvykle klesá v závislosti na rostoucí teplotě. U nanokapalin toto platí také. Zvýšení viskozity způsobené nanočásticemi nepředstavuje pro systém generující teplo, jako je například transformátor, velký problém, protože odvod vygenerovaného tepla je schopné kompenzovat volbou vhodných nanočástic. Volba vhodného surfaktantu také snižuje viskozitu, protože oslabuje vazbu mezi nanočásticemi. [28]

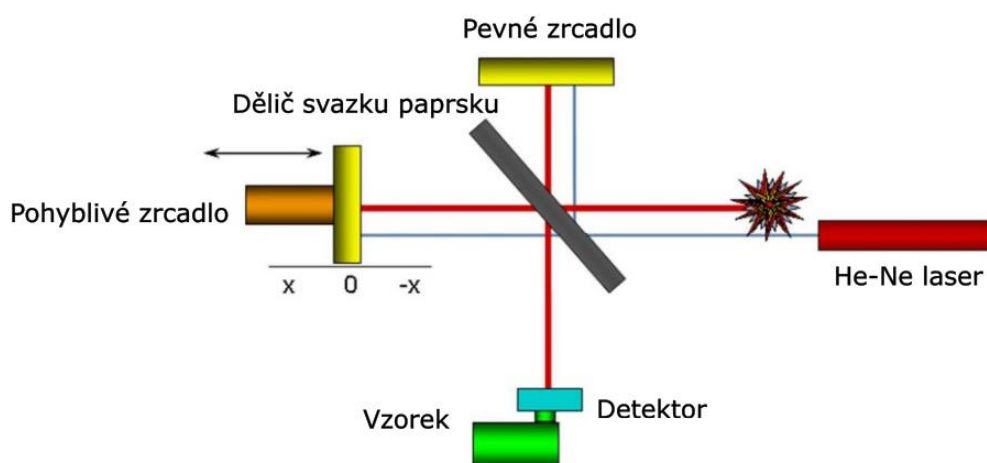
3.8 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) je spektroskopická metoda, pomocí které lze na principu absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem sledovat intenzitu spektra. Studium spektra lze odhalit v oleji rozpuštěné zplodiny chemických reakcí. Pro nanokapalinu lze tuto metodu využít k potvrzení přítomnosti nanočástic.

Jedná se nedestruktivní analytickou metodu, zkoumající reakci materiálu na infračervené záření o vlnové délce mezi 780 nm a 300 μm . Infračervené záření se běžně dělí na blízké (0,78 – 3 μm), střední (3–30 μm) a vzdálené (30–300 μm). Vzhledem k tomu, že závislost energie na vlnové délce je logaritmická, zavedla se jednotka vlnočtu, která se vyjadřuje jako převrácená hodnota vlnové délky. Její jednotka je cm^{-1} . Fotony infračerveného záření předávají energii molekulám, čímž způsobují změnu vibračního nebo rotačního stavu molekul. Při vibračním pohybu molekul je energie přeměňována mezi potenciální a kinetickou formou energie. Vibrační pohyby se dělí na valenční a deformační. Jako valenční vibrace označujeme

periodickou změnu vazebné délky v molekule (symetrická a asymetrická změna), jako deformační označujeme periodickou změnu ve vazebním úhlu atomů v molekule. [58] [59]

Infračervený spektrometr s Fourierovou transformací (FTIR spektrometr) jako zdroj infračerveného záření používá keramickou tyčinku s rozžhaveným odporovým drátem. Pro měření celého spektra se využívá Michelsonův interferometr, který je složen z polopropustného děliče paprsků a dvou zrcadel. Jedno z těchto zrcadel je pevně umístěno a druhé je umístěno tak, aby bylo schopné měnit svoji vzdálenost od děliče paprsků. Paprsek ze zdroje se na děliči částečně odrazí k pevně umístěnému zrcadlu a částečně projde skrz něj k zrcadlu pohyblivému. Po odrazu od zrcadel dojde na děliči paprsků ke konstruktivní, nebo destruktivní rekombinaci. Druh rekombinace závisí na poloze pohyblivého zrcadla. [58] [59]



Obrázek 22: Znárodnění schématu FTIR [60]

Rekombinovaný paprsek je odražen do prostoru se vzorkem a dále k detektoru. Získaný signál projde Fourierovou transformací a je tak převeden na graf závislosti intenzity záření na frekvenci (infračervené spektrum).[58]

Měřicí techniky zahrnují transmisi a totální utlumený odraz (*Attenuated total reflectance-ATR*). Při transmisi světlo z interferometru prochází vzorkem, přičemž požadovaná dráha paprsku vzorkem závisí na jeho stavu (pevná látka, kapalina nebo plyn). ATR se stala základní metodou testování vzorků. Hlavní výhodou je absence přípravy vzorků pro kapalně a pevné vzorky. Při odrazu světla od některých materiálů (diamant, ZnSe) pod kritickým úhlem dochází k úplnému odrazu světla, přičemž malé množství světla je absorbováno do vzorku, který je v kontaktu s povrchem krystalu. [14]

3.9 Bod vzplanutí, hoření a tuhnutí

Bod vzplanutí a hoření je důležitým parametrem z hlediska požární bezpečnosti. Bod vzplanutí je definován jako teplota, při které se vytvoří směs par testovaného vzorku se vzduchem, která se po přiblížení plamene vznítí a poté okamžitě zhasne. Bod hoření je teplota, při které směs plynů nad vzorkem hoří kontinuálně. [14]

Parametr lze měřit pomocí Pensky – Martensova přístroje, který se zachycen na obrázku 23. K zahřátému oleji se v určitých intervalech přikládá rozžhavené tělíčko, v případě vzplanutí se zaznamená teplota. Teplota u olejů by měla být vyšší než 150 °C. [14]



Obrázek 23: Pensky – Martensův přístroj, převzato z [61]

Bod tuhnutí je teplota, při které dochází k tuhnutí oleje a dochází v něm k růstu krystalů. Tento parametr hraje roli v případě, že by byl transformátor provozován v chladném klimatu. [14]

V případě nanokapalin, nanočástice mění fyzikálně-chemické vlastnosti olejů, včetně jejich bodu vzplanutí. Nejdůležitějším parametrem z těchto tří je bod vzplanutí, kvůli požární bezpečnosti. Experimentální studie ukazují, že bod vzplanutí nanokapalin je vyšší než bod vzplanutí čistých olejů. Ve studii [62] byly nanočástice Al_2O_3 , TiO_2 a ZnO suspendovány v množství 0,05 g/l v minerálním oleji. Hodnoty bodu vzplanutí všech připravených nanokapalin se zvýšily, přičemž nejvyšší hodnota byla zjištěna u ZnO a to 23,93 %. [28], [62]

Nanokapaliny nemají oproti čistým olejům výraznou výhodu, pokud jde o bod tuhnutí. [28]

4 Příprava a diagnostika vlastní izolační nanokapaliny

V praktické části diplomové práce bylo připraveno několik vzorků nanokapalin s různými typy nanočástic. Pro všechny nanokapaliny byl dodržen stejný postup přípravy i diagnostiky. Byla použita two step metoda, s magnetickým mícháním a ultrasonikací.

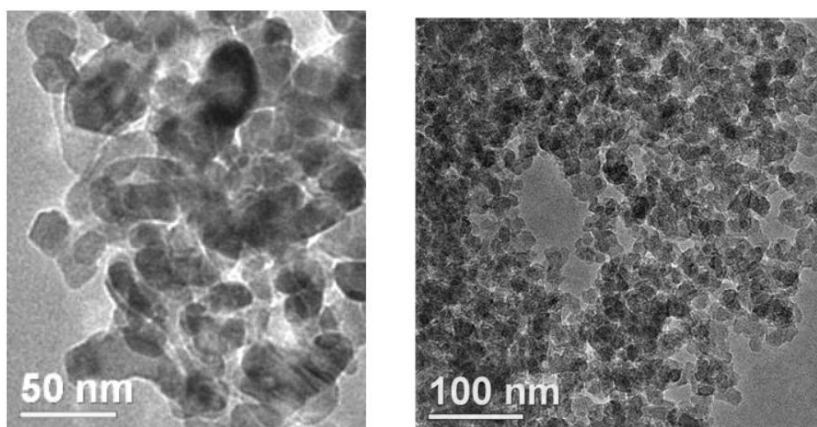
Byla také provedena komplexní charakteristika vstupního materiálu – řepkového oleje, kdy bylo navíc změřeno číslo kyselosti, obsah vody, dynamická viskozita a pomocí FTIR bylo jeho spektrum porovnáno s izolační kapalinou FR3.

4.1 Použité nanočástice

V tabulce 6 jsou vypsány všechny typy nanočástic, které byly použity. Všechny zmíněné nanočástice jsou vybrány na základě článků, kde byly použity v kombinaci s izolačním esterovým olejem, s výjimkou nitridu hliníku a nitridu křemíku. V případě AlN byl nalezen pouze článek, připravující nanokapalinu pomocí single step metody. [63] SiN byl zvolen opět čistě experimentálně, v závislosti na jeho izolačních a tepelných vlastnostech, žádný článek nebyl nalezen, popisující jeho vlastnosti v nanokapalině. V obou případech se jedná o čistě experimentální rozhodnutí. Nanočástice neobsahovaly žádnou povrchovou úpravu nebo surfaktant. Všechny nanočástice byly před aplikací vysušeny po dobu 24 hodin při 60 °C, neboť je zde riziko navázání vody.

Tabulka 6: Nanočástice použité při přípravě nanokapaliny

| Typ nanopřířady | Zkratka | Čistota | Velikost | Provedení |
|-----------------|------------------|---------|------------|------------|
| Nitrid křemíku | SiN | >98,6 % | 25 +- 5 nm | x |
| Nitrid boru | BN | 99.85+% | 65-75 nm | Hexagonal |
| Nitrid hliníku | AlN | >92% | 20 nm | x |
| Oxid křemičitý | SiO ₂ | 99 + | 20 nm | hydrofilní |
| Oxid zinečnatý | ZnO | 99+ | 30 nm | x |
| Oxid titaničitý | TiO ₂ | 99 + | 20 nm | x |



Obrázek 24: Bližší pohled na nanočástice TiO₂ (vpravo) a SiO₂ (vlevo), převzato z [64]

4.2 Vstupní kapalina – řepkový olej

Jako základní kapalina byl použit řepkový olej. Olej byl výrobcem podroben procesu odslizení, při kterém se z oleje oddělují fosfatidy. Dále byl olej neutralizován od chlorofylu. [65] I přes tyto opatření se jedná o potravinářský olej. Tato skutečnost měla vliv na stabilitu přeskokové napětí, neboť i při opakovaných měřeních dosahoval variačního koeficientu 21 %. Pro komparativní účely „před a po“ aplikací nanočástic je ale dostačující. Jako izolační olej by ale podle normy ČSN EN 60156 neuspěl. Obsah vody byl změřen pomocí coulometrické titrační metody podle Karl Fischera, číslo kyselosti bylo kvantifikováno s využitím alkaické modři 6B. Dynamická viskozita byla změřena vibračním viskozimetrem SV-10, který je vyfocen v kapitole 3.7. Vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 7.

Tabulka 7: Základní vlastnosti vstupního oleje

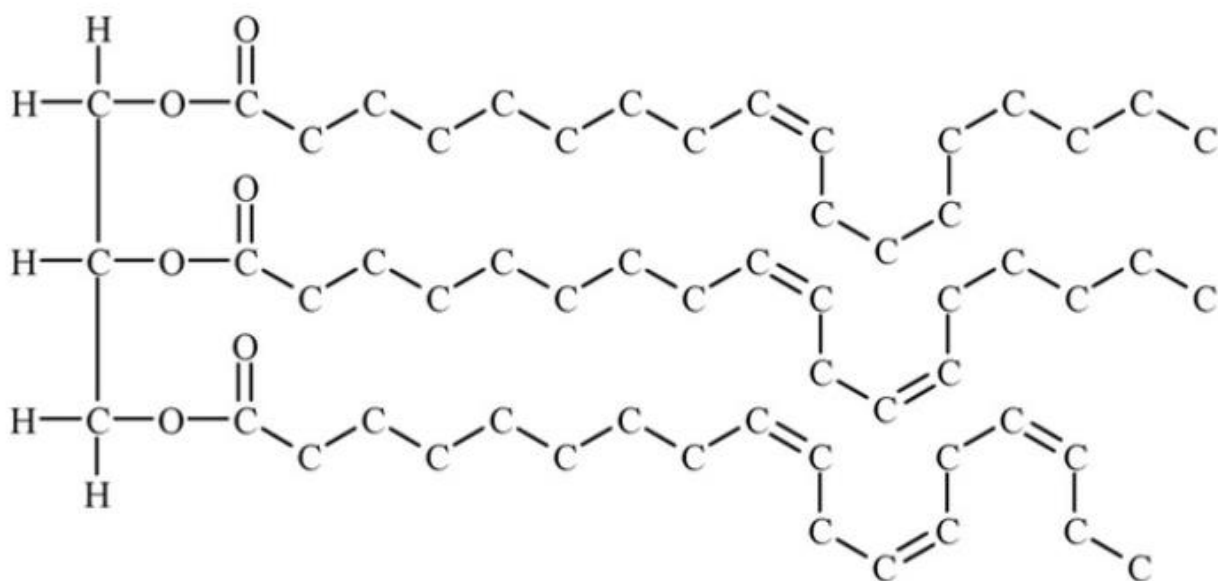
| Vlastnosti | Řepkový olej |
|--------------------------------------|--------------|
| Přeskokové napětí 2,5 mm (kV) | 52,66 |
| Ztrátový činitel při 25 (°C) | 0,00106 |
| Ztrátový činitel při 90 (°C) | 0,0306 |
| Obsah vody (mg/kg) | 314 |
| Číslo kyselosti (mg KOH/g) | 1,285 |
| Dynamická viskozita při 40 °C (mPas) | 28,47 |



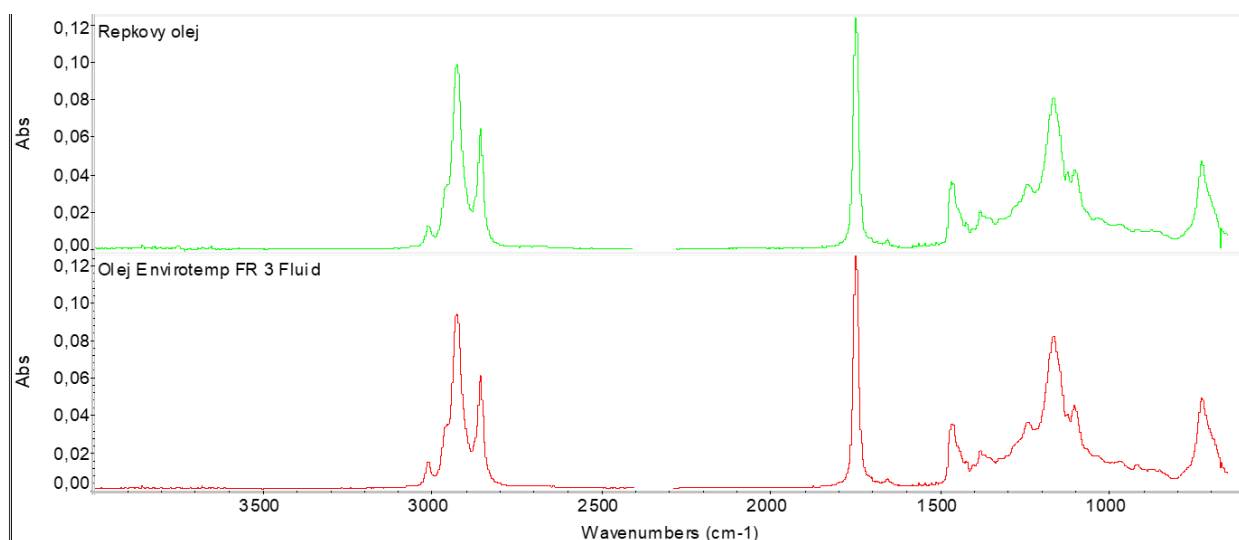
Obrázek 25: Základní kapalina

Dále bylo proměřeno FTIR spektrum řepkového oleje a byl porovnán s izolační kapalinou FR3. FTIR-ATR spektra byla zaznamenána v rozsahu vlnových délek 650 až 4 000 cm^{-1} . Celkový spektrální vzhled obou vzorků olejů je téměř identický (obrázek 27).

Rostlinné oleje se skládají převážně z esterů glycerolu s trojmocnými mastnými kyselinami, běžně označované jako triacylglyceroly (TAG). Hlavní peaky spojené s funkčními skupinami TAG zahrnovaly všechny vlnočty zmíněné v tabulce 8. Dále je popsáno, o jaký typ pohybu se jednalo při interakci s IR paprskem. Výsledky byly formulovány díky článku [66]. Obecná molekulární struktura řepkového oleje je na obrázku 26.



Obrázek 26: Molekulární struktura řepkového oleje, převzato z [67]



Obrázek 27: Naměřené spektrum metodou FTIR, porovnáno s olejem FR3

Tabulka 8: Identifikace jednotlivých peaků a jejich charakterizace [66]

| Vlnočet (cm^{-1}) | Skupina | Vibrační režim |
|------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 3010 | =C-H (cis-) | Valenční |
| 2924 | -C-H (CH ₂) | Valenční asymetrické |
| 2856 | -C-H (CH ₂) | Valenční symetrické |
| 1746 | -C=O (ester) | Valenční |
| 1650 | -C=C- (cis-) | Valenční |
| 1465 | -C-H (CH ₂) | Deformační |
| 1420 | =C-H (CH ₃) | Deformační |
| 1375 | -C-O | Valenční |
| 1240 | -C-O | Valenční |
| 1160 | -C-O | Valenční |
| 1120 | -C-O | Valenční |
| 1110 | -C-O | Valenční |
| 966 | -HC=CH (trans-) | Deformační mimorovinné |
| 721 | -CH ₂ - | Kyvadlová |
| 690 | -HC=CH- (cis) | Deformační mimorovinné |

4.3 Postup přípravy nanokapaliny

Jako základní kapalina byl použit čistý řepkový olej. Nejprve bylo odlito 440 ml oleje, přičemž 400 ml bude dále použito na měření přeskovového napětí a 40 ml se využije na měření ztrátového činitele a permitivity. Olej byl před procesem míchání vysušen při 60 °C po dobu 24 hodin, aby došlo ke snížení vlhkosti, která by měla nepříznivý vliv na dielektrické vlastnosti oleje. Olej se po vysušení vloží do vakuové komory, kde je kapalina vystavena vakuu po dobu jedné hodiny. Zde bylo dosaženo 0,1 baru, jedná se o nízké vakuum. [68] Použitá vakuová komora od firmy VacuCell je zachycena na obrázku 28.



Obrázek 28: Vakuová komora VacuCell

Mezitím bylo naváženo 1,0125 g nanočástic. Jedná se o 0,25 % hmotnostní koncentrace. Po aplikaci vakua se do oleje vsypou vybrané nanočástice. Olej s nanočásticemi byl míchán na magnetickém míchadle při 520 ot/min po dobu 60 minut, poté byl podroben ultrasonickému míchání (Sonopuls HD 2070, 20 kHz, 50 % amplitudy), opět po dobu jedné hodiny. V případě menšího vzorku (40 ml), byl vzorek podroben míchání pouze po dobu 30 minut. Docházelo jinak k značnému přehřívání a stárnutí oleje. Na menší objemy se to také jevilo jako dostačující. Na ultrasonické míchání byl použit nástavec Sonopuls VS 70. V posledním kroku byla nanokapalina opět umístěna na 60 minut do vakuové komory, aby se odstranily nehomogenity vzniklé během míchání. Příprava jednoho vzorku trvala tedy celkem 4 hodiny. Po připravení nanokapaliny musela být ihned analyzována, aby nedošlo k většímu stupni sedimentace a aglomerace.



Obrázek 29: Ultrasonické míchání

4.4 Měřené parametry

V rámci diagnostiky nanokapaliny byly měřeny určité dielektrické parametry. Jedná se o přeskovové napětí, ztrátový činitel, relativní permitivitu a rezistivitu. Dále bylo analyzováno spektrum FTIR nanokapaliny s SiO_2 nanočásticemi. Všechny zmíněné parametry byly měřeny v souladem s normami zmíněnými v kapitolách 3.1, 3.3 a 3.4.

4.4.1 Přeskovové napětí

Bylo změřeno přeskovové napětí všech vzorků s nanočásticemi a čistého vzorku. Měření probíhalo díky vysokonapětovému zdroji od firmy High Volt, který je zachycen na obrázku 31. Bylo použito 400 ml vzorku, vzdálenost elektrod byla 2,5 mm. Nárůst napětí byl 1,5 kV za vteřinu. Mezi jednotlivými měřeními byly 3 minuty čekání, poté, co byl vzorek

promíchán, z důvodu vzniků sazí po přeskoku (obrázek 30). Dohromady bylo změřeno šest přeskoků pro každý vzorek, z těchto hodnot byla vypočítána průměrná hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient.



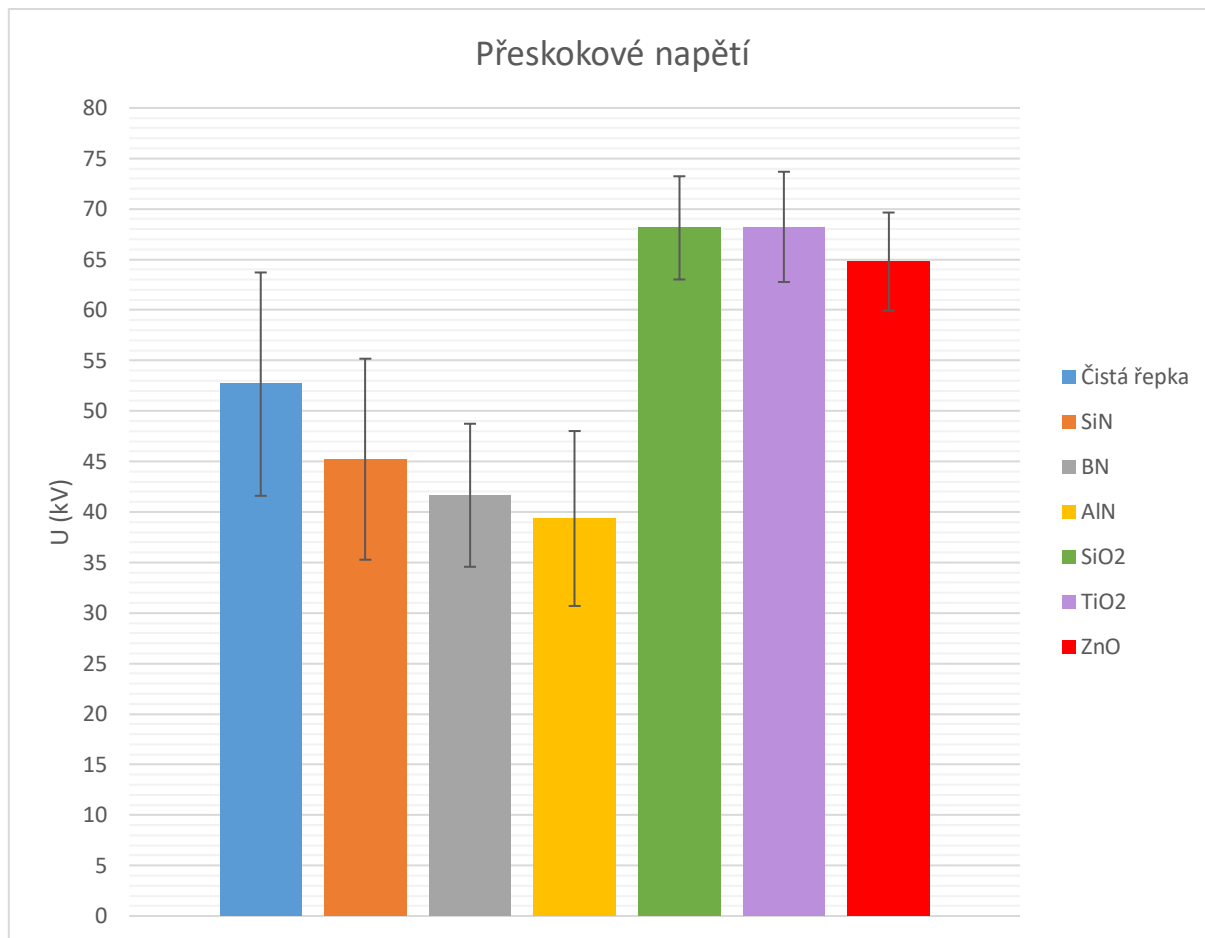
Obrázek 30: Vzniklé saze po přeskoku ve vzorku čisté řepky (vlevo), vysokonapěťové pracoviště (vpravo)



Obrázek 31: Olej v kleci (vlevo), vysokonapěťový zdroj (vpravo)

Z naměřených přeskoků je patrné, že nejvyšší hodnoty dosahovaly nanočástice SiO_2 a TiO_2 , přičemž průměrná hodnota přeskového napětí se u obou vzorků rovnala 68 kV. Jedná se o 29 % zlepšení oproti čisté základní kapalině. Došlo také ke stabilizaci, neboť variační koeficient byl pro vzorek SiO_2 roven 7,5 % a pro TiO_2 byl 11 %. Další zlepšení bylo u vzorku se ZnO nanočásticemi, zde došlo k 23% zlepšení a jeho variační koeficient se rovnal 7,5 %. U ostatních vzorků došlo ke zhoršení přeskového napětí. Zde je možné, že byla zvolena

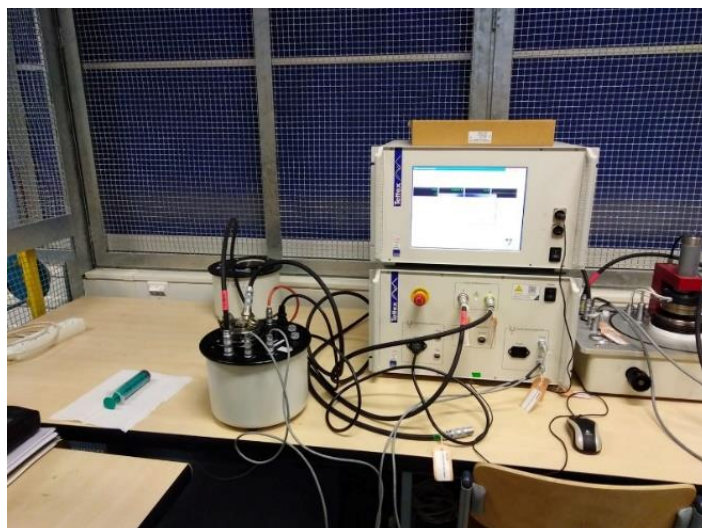
špatná hmotnostní koncentrace. Pro různé nanočástice je vhodné upravit hmotnostní koncentrace, nejsou si totiž strukturálně ani chemicky rovny. V případě této diplomové práce byl využit jeden postup pro všechny vzorky, který se nejeví jako vhodný pro všechny typy nanočástic.



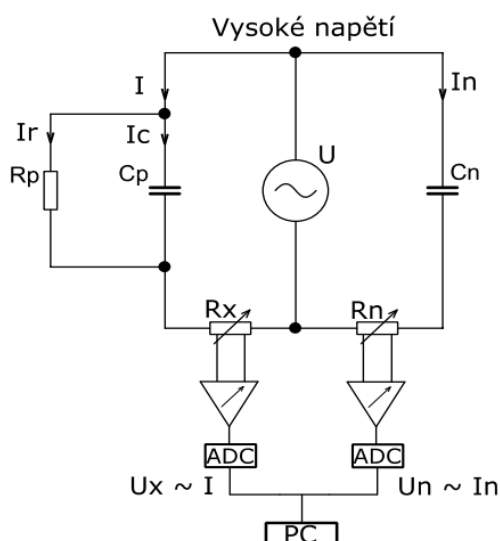
Obrázek 32: Přeskokové napětí připravených vzorků nanokapalin v porovnání s čistým řepkovým olejem

4.4.2 Ztrátový činitel a relativní permitivita

Bylo provedeno měření ztrátového činitele a relativní permitivity v závislosti na teplotě. K měření byl použit analyzátor pevných a kapalných dielektrik Tettex 2830/2831 (obrázek 33). Měření probíhalo od 30 °C do 90 °C podle normy ČSN EN 60247. Obvod byl napájen 500 V, frekvence byla 50 Hz, měřící cela je podrobně popsána v kapitole 3.3. Tettex používá pro měření ztrátového činitele a relativní permitivity metodu dvojitého vektometru, kdy je měřen proud I_n referenčním kondenzátorem C_n a proud I_x měřeným vzorkem C_x . Tyto proudy jsou měřeny přesnými bočníky R_x a R_n . Data jsou následně digitalizována.



Obrázek 33: Analyzátor pevných a kapalných dielektrik Tettex 2830



Obrázek 34: Metoda dvojitého vektometru, převzato z [69]

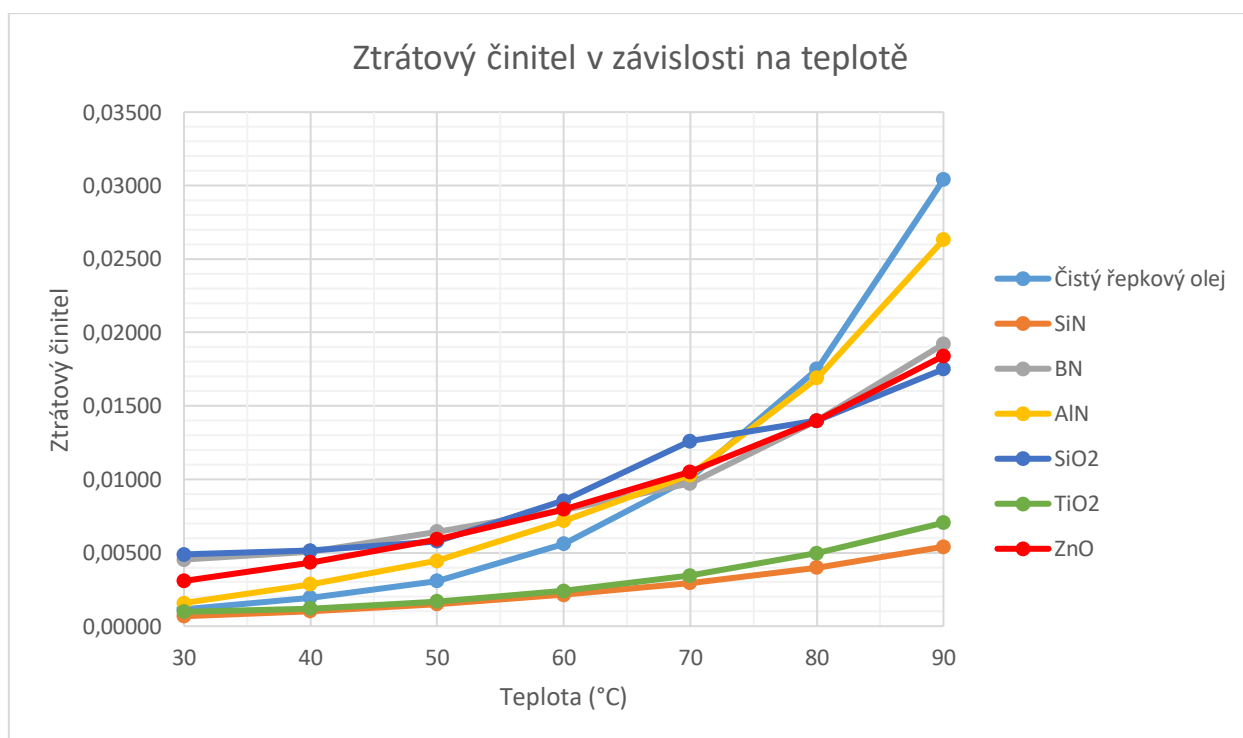
Na měření bylo použito 40 ml vzorku. Bylo zajištěno řádné očištění elektrodového systému a opatrná manipulace, aby nedošlo ke kontaminaci vzorku. Jednotlivé hodnoty byly zaznamenány a vyneseny do grafu (obrázek 35).

Z naměřených dat a z teorie je patrné, že ztrátový činitel s teplotou stoupá. [52] Nejnižším a nejvíce stabilním ztrátovým činitelem disponoval vzorek čisté řepky s příměsí SiN nanočástic. Je obecně známo, že provozní teplota transformátoru se pohybuje okolo 40 °C. [14] Vezmeme-li v potaz tuto konkrétní hodnotu, jeví se jako nejvíce adekvátní vzorky s příměsí TiO₂ (0,00119) a SiN (0,00102). Jejich teplotní stabilita je také nejlepší ze všech připravených vzorků. Se vzrůstající teplotou (70 °C až 90 °C) začínají vzorky

s nanočásticemi překonávat čistý řepkový olej. Je ale předpokládáno, že bezporuchový transformátor na této teplotě nebude operovat.

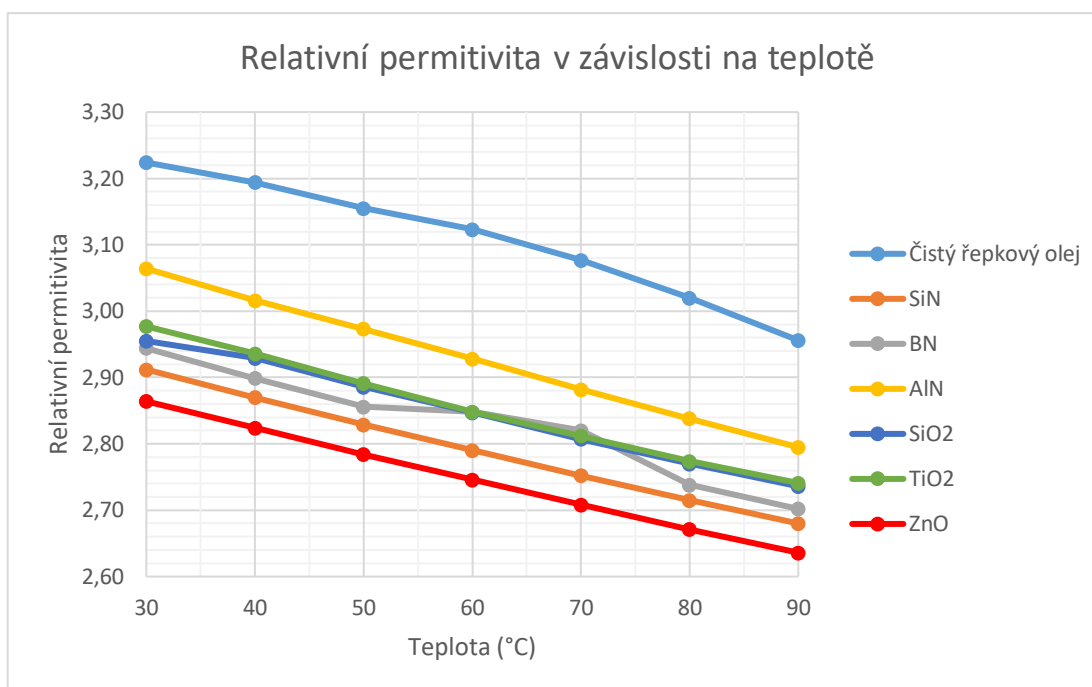
U křivky vzorku s SiO₂ nanočásticemi je možné pozorovat vysoký nárůst okolo teploty 70 °C. Zde se může jednat o chybu měřicího přístroje. Tettex se u měření některých vzorků nanokapalin jevil jako problematický – měl problém se vyvážit, ustálit se na jedné hodnotě. Poté docházelo k výpočetním chybám. Vzorek s BN nanočásticemi byl namíchán a měřen celkem čtyřikrát, přičemž Tettex byl schopen se vyvážit a zobrazovat spolehlivé výsledky až u posledního měření. Vzorky AlN a SiN byly také přeměřovány několikrát. Spolehlivost výsledků je zobrazena na Tettexu barvou vyobrazovaných čísel (oranžová – chyba měření, tmavě zelená – hodnoty nejsou stabilní, přístroj je v procesu vyvažování a světle zelená – hodnoty jsou přesné a stabilní). Pro odečet hodnot se vždy čekalo na ustálení.

Další možností může být vypařování vody ze vzorku. V případě, že by vzorek navlhnul (během manipulace, špatně umyté pomůcky, voda z okolní atmosféry), projevilo by se to na strmosti nižších hodnot teploty.



Obrázek 35: Ztrátový činitel jednotlivých vzorků v závislosti na teplotě

Bylo provedeno měření relativní permitivity v závislosti na teplotě. K měření byl opět použit analyzátor pevných a kapalných dielektrik Tettex 2830 (obrázek 33). Z grafu (obrázek 36) je patrné, že relativní permitivita s teplotou klesá. Všechny vzorky s nanočásticemi mají nižší relativní permitivitu ve všech teplotách oproti čistému vzorku. Nejnižší relativní permitivitou disponuje vzorek se ZnO nanočásticemi.



Obrázek 36: Relativní permitivita jednotlivých vzorků v závislosti na teplotě

Opět lze pozorovat necharakteristický nárůst při teplotě 60 a 70 °C pro vzorek s BN nanočásticemi. Jedním z možných vysvětlení je výpočetní chyba, nebo opět vypařování vody ze vzorku.

4.4.3 Vnitřní rezistivita

Jako poslední měření provedené na přístroji Tettex 2830/2831 bylo měření vnitřní rezistivity při stejnosměrném napětí. Před měřením vzorku byla měřící cela zkratována po dobu 30 vteřin. Měřící napětí bylo stejnosměrné o hodnotě 500 V. Vnitřní rezistivita byla odečtena po 60 s od přiložení napětí. Byla proměřena pouze hodnota 90 °C. Vzhledem k tomu, že rezistivita oleje s teplotou klesá, je tuto hodnotu možno považovat za nejnižší možnou, která by se v transformátoru za nepříznivých vlivů mohla vyskytovat.

Naměřené data jsou obsaženy v tabulce 9. Nejvyšší hodnotou disponoval vzorek s TiO₂ nanočásticemi, kdy byla odečtena hodnota 59,18 GΩ.m. Všechny vzorky měly obecně vyšší vnitřní rezistivitu než čistý řepkový olej.

Tabulka 9: Vnitřní rezistivita jednotlivých vzorků

| | Řepkový olej | SiN | BN | AlN | SiO ₂ | TiO ₂ | ZnO |
|----------------------------------|--------------|-------|-------|------|------------------|------------------|------|
| Rezistivita v 60 s (GΩ.m) | 4,35 | 50,84 | 16,62 | 9,99 | 55,59 | 59,18 | 9,91 |

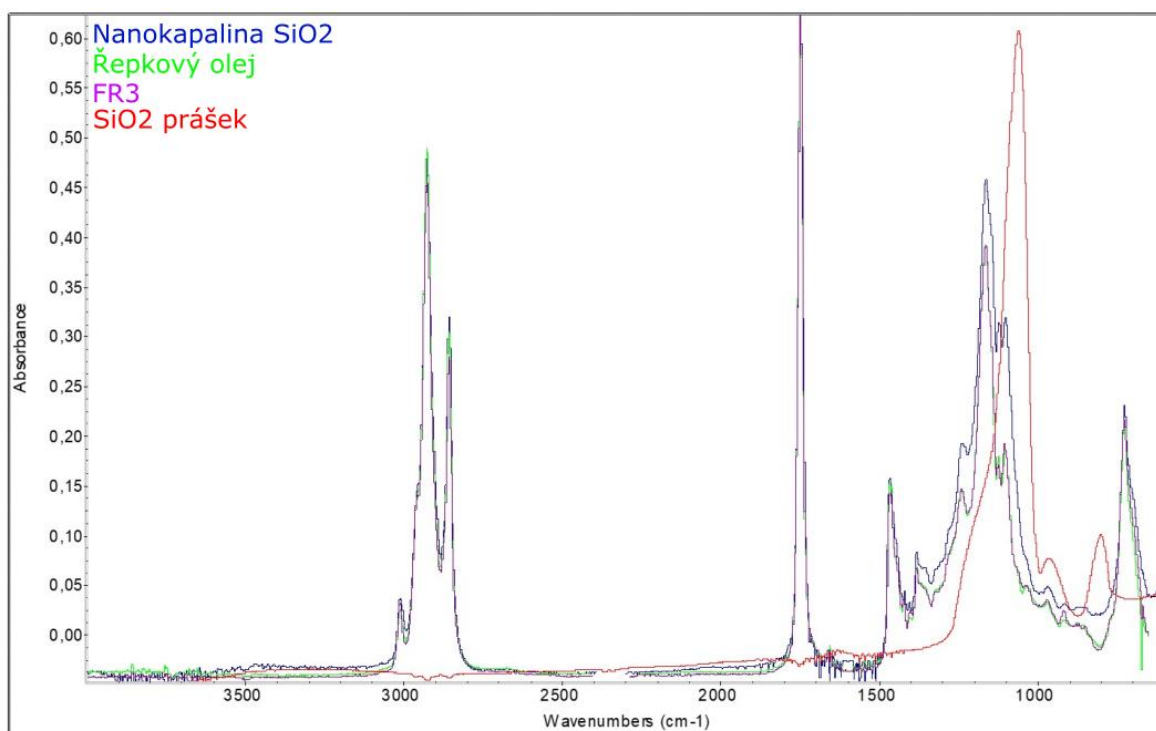
4.4.4 FTIR analýza vzorku SiO₂

Měření infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) bylo prováděno pomocí spektrálního analyzátoru Nicolet 380 (Thermo Scientific), vybaveným ZnSe krystalem pro měření ATR. Vzorek oleje se pro spektrální měření roztíral přímo na krystal ZnSe. FTIR-ATR spektra byla zaznamenána v rozsahu vlnových délek 650 až 4 000 cm⁻¹.



Obrázek 37: Přístroj Nicolet 380 (vlevo), měření ATR oleje (vpravo)

Při měření spektra ATR metodou byl nejprve změřen čistý vzorek oleje, poté prášek nanočástic SiO₂, a nakonec nanokapalina s SiO₂ nanočásticemi o hmotnostním zlomku 0,25 %. Analýza suchého prášku SiO₂ pomocí FTIR ATR ukázala spektrální pásmo v oblasti 700-1300 cm⁻¹. Pozorované absorpční pásy odpovídají 800 cm⁻¹ deformačnímu ohybu Si-O, 961 cm⁻¹ valenčnímu protažení Si-OH, 1083 cm⁻¹ asymetrickému valenčnímu protažení Si-O-Si. Výsledky byly interpretovány pomocí článku [70]. Ve spektru pro nanokapalinu došlo k nepatrnému nárůstu v oblasti okolo 1083 cm⁻¹ a 800 cm⁻¹, pravděpodobně dokazující přítomnost nanočástic v oleji.



Obrázek 38: FTIR spektrum čistého SiO₂ prášku, oleje FR3, řepkového oleje a namíchané nanokapaliny

4.5 Zhodnocení praktické části

Proces míchání nanokapaliny je zdlouhavý a náročný, s nejasnými výsledky dobré dispergace nanočástic. Možný dostupný způsob, jak ověřit homogenitu suspenze je změření dielektrických vlastností, které by se při špatné dispergaci nanočástic měly zhoršit. Je zde možnost, že dosavadní zavedený model přípravy je nevhodný pro BN, AlN a SiN nanočástice, které v případě přeskokového napětí výrazně zhoršily elektrickou pevnost. Je zde také možné nevhodné zvolení hmotnostního zlomku, který by mohl být buď nižší nebo vyšší pro optimalizaci vlastností. Další z možných vysvětlení je velikost nanočástic, která se u BN pohybuje okolo 65 až 75 nm a u AlN okolo 25 nm. Stabilita nanokapaliny nebyla doposud ověřována.

V rámci přeskokového napětí obecně nejlepších výsledků dosahovaly nanokapaliny s přidavkem SiO₂ a TiO₂, kdy došlo ke 29% zlepšení. Byly tak ověřeny předpoklady shodující se s článkem [27].

Co se týče ztrátového činitele, nejnižších hodnot a nejlepší teplotní stability dosahovaly nanokapaliny s TiO₂ a SiN nanosložkami. Zde je velmi zajímavá SiN nanokapalina, která dosahovala naprosto skvělých vlastností v závislosti na teplotě. Bylo by tedy zajímavé,

v budoucím výzkumu optimalizovat hmotnostní zlomek tak, aby došlo minimálně k nezhoršení přeskokového napětí.

Relativní permitivita klesala s teplotou, kde nejnižších a nejstabilnějších výsledků v závislosti na teplotě dosahovaly nanokapaliny s SiN a ZnO nanočásticemi. Je nutné podotknout, že všechny nanokapaliny měly nižší relativní permitivitu než čistý vzorek.

Vnitřní rezistivita byla proměřena při 90 °C. Nejvyšších hodnot dosahovaly vzorky SiO₂, TiO₂ a SiN. Zde se opět nanočástice SiN ukazují jako neprozkoumaný a perspektivní materiál v oblasti izolačních nanokapalin.

Měření spektra FTIR pomocí ATR metody byla potvrzena přítomnost SiO₂ nanočástic a jejich malý vliv na finální spektrum.

Z ekonomického hlediska ku dielektrickým by se nejvíce vyplatily nanočástice ZnO, kdy 50 gramů těchto nanočástic vyjde na 2000 Kč, což je činní nejlevnějšími z vybraných a úspěšných. Jako nejdražší jsou nanočástice SiN, kdy 50 g vyjde na 5000 Kč. [71], [72]

Zhodnocení a závěr

V práci byly shrnuty hlavní výhody a nevýhody biodegradabilních izolačních kapalin. Mezi jejich jasné výhody patří biodegradabilita a jejich původ z obnovitelného zdroje, dále jejich vysoká požární bezpečnost. Mezi nevýhody se řadí jejich bod tuhnutí a vysoká viskozita. Byl zde nastíněn historický vývoj a motivace k zavedení těchto kapalin. Dále byli vyjmenováni hlavní komerčně dostupní zástupci, jako je Envirotemp FR3, BIOTEMP, MIDEL eN 1215/MIDEL eN 1204 a ENVITRAFOL.

Dalším bodem práce jsou elektroizolační nanokapaliny. Jsou zde popsány obecné metody přípravy, dělí se podle počtu kroků na single step a two step metody. Jako vhodná metoda se pro elektroizolační nanokapaliny jeví two step metoda, kdy jsou nanočástice přimíchávány a následně dispergovány do oleje. Problematika stabilizace nanokapalin je zde také nastíněna, kdy se jako vhodný způsob stabilizace jeví stérický. Krátká rešerše poté objasňuje volbu nanočástic, kdy byly zvoleny nanočástice SiN, TiO₂, SiO₂, ZnO, BN a AlN.

Definované metody diagnostiky elektroizolačních nanokapalin byly vztaženy k normám.[51], [53], [55] Jedná se o přeskokové napětí, ztrátový činitel, relativní permitivitu a vnitřní rezistivitu. Jako neaplikovaná metoda zde bylo zmíněno měření stejnosměrným napětím, na kterém byl vysvětlen princip přeskoku v přítomnosti nanočástic. Jako fyzikálně-chemické metody je zde měření dynamické viskozity, čísla kyselosti, obsahu vody a bodu vzplanutí, tuhnutí a hoření. Požární bezpečnost nebyla v praktické části měřena. Jako zástupce spektrometrické analýzy je zde měření FTIR.

Poslední kapitola popisuje přípravu nanokapaliny a její následnou diagnostiku. Byla použita two step metoda s magnetickým mícháním a ultrasonikací. Dále byly změřeny dielektrické parametry pro každý vzorek. Pro vzorek s SiO₂ bylo provedeno měření FTIR, kde se potvrdila přítomnost nanočástic. Jako nejvhodnější nanočástice byly určeny TiO₂. Je ale nutné podotknout, že nanočástice SiN by zasloužily podrobnější zkoumání a optimalizaci jejich hmotnostního zlomku.

Literatura

- [1] M. Srivastava, S. K. Goyal, and A. Saraswat, “Ester oil as an alternative to mineral transformer insulating liquid,” *Mater Today Proc*, vol. 43, pp. 2850–2854, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.066.
- [2] U. Mohan Rao, I. Fofana, T. Jaya, E. M. Rodriguez-Celis, J. Jalbert, and P. Picher, “Alternative dielectric fluids for transformer insulation system: Progress, challenges, and future prospects,” *IEEE Access*, vol. 7. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 184552–184571, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960020.
- [3] M. Duval, D. Cauchon, S. Lamothe, and Y. Giguère, “Paraffinic Transformer Oils for use at Low Temperatures,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-18, no. 6, pp. 586–590, 1983, doi: 10.1109/TEI.1983.298696.
- [4] “pour point | Energy Glossary.” https://glossary.slb.com/en/terms/p/pour_point (accessed Feb. 12, 2023).
- [5] I. Fofana, “50 years in the development of insulating liquids,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 5, pp. 13–25, 2013, doi: 10.1109/MEI.2013.6585853.
- [6] Z. Shen, F. Wang, Z. Wang, and J. Li, “A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141. Elsevier Ltd, May 01, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.110783.
- [7] “Hořlavé a vysoce hořlavé látky. Rozdíly, bod vzplanutí a vznícení | BOZP.cz.” <https://www.bozp.cz/aktuality/horlave-a-vysoce-horlave-latky/> (accessed Feb. 17, 2023).
- [8] Z. Leonowicz, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Electromagnetic Compatibility Society, IEEE Power & Energy Society, IEEE Industry Applications Society, and Industrial and Commercial Power Systems Europe (4th : 2020 : Online), *Conference proceedings : 2020 IEEE International Conference Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I & CPS Europe) : 9-12 June, 2020, Madrid, Spain*.
- [9] “Řepka olejná.” <https://cit.vfu.cz/vegetabilie/plodiny/czech/repka.htm> (accessed May 23, 2023).
- [10] “Glycine max (sója luštinatá) | BioLib.cz.” <https://www.biolib.cz/cz/taxon/id39935/> (accessed May 23, 2023).

- [11] “Slunečnice roční - Helianthus annuus L. - Slunečnice.cz.”
<https://www.slunecnice.cz/tipy/slunecnice-rocni/> (accessed May 23, 2023).
- [12] J. Jacob, P. Preetha, and S. T. Krishnan, “Review on natural ester and nanofluids as an environmental friendly alternative to transformer mineral oil,” vol. 3, pp. 33–43, 2020, doi: 10.1049/iet-nde.2019.0038.
- [13] B. García, A. Ortiz, C. Renedo, D. F. García, and A. Montero, “Use performance and management of biodegradable fluids as transformer insulation,” *Energies*, vol. 14, no. 19. MDPI, Oct. 01, 2021. doi: 10.3390/en14196357.
- [14] V. Mentlík, *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN - technická literatura, 2008.
- [15] J. Malde, M. Daghray, and A. Gyore, “Natural and Synthetic Ester Liquids-How They Differ, What They Deliver”.
- [16] “Oxidation Inhibitor And Reinhibiting Oil-Filled Transformers | SDMyers.”
<https://www.sdmyers.com/knowledge-vault/oxidation-inhibitor-and-reinhibiting-oil-filled-transformers/> (accessed Feb. 15, 2023).
- [17] “Oleic Acid | C18H34O2 | CID 445639 - PubChem.”
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Oleic-acid> (accessed May 21, 2023).
- [18] “Linoleic Acid | C18H32O2 | CID 5280450 - PubChem.”
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5280450> (accessed May 21, 2023).
- [19] “Linolenic Acid | C18H30O2 | CID 5280934 - PubChem.”
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5280934> (accessed May 21, 2023).
- [20] H. Lizhi, K. Toyoda, and I. Ihara, “Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition,” *J Food Eng*, vol. 88, no. 2, pp. 151–158, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.12.035.
- [21] “FR3 Fluid Technical Details | Cargill Bioindustrial | Cargill.”
<https://www.cargill.com/bioindustrial/fr3-fluid/fr3-fluid-technical-details> (accessed Feb. 13, 2023).
- [22] “The Benefits of FR3 Fluid vs. Mineral Oil for Distribution Transformers.”
<https://solutions.borderstates.com/fr3-fluid-vs-mineral-oil/> (accessed Feb. 13, 2023).
- [23] “Materials Compatibility: MIDEL eN 1215 and MIDEL eN 1204 | MIDEL.”
<https://www.midel.com/blog/materials-compatibility-midel-en/> (accessed Feb. 13, 2023).
- [24] “MIDEL eN 1204 natural ester transformer fluid.” <https://www.midel.com/midel-range/midel-en1204/> (accessed Feb. 13, 2023).

- [25] “MIDEL eN 1215 natural ester transformer fluid.” <https://www.midel.com/midel-range/midel-en1215/> (accessed Feb. 13, 2023).
- [26] “ABB Review 2/2012 - Transformers transformed.” <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1LAB000500&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (accessed Feb. 13, 2023).
- [27] V. Mentlik, P. Trnka, J. Hornak, and P. Totzauer, “Development of a biodegradable electro-insulating liquid and its subsequent modification by nanoparticles,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 3, Feb. 2018, doi: 10.3390/en11030508.
- [28] M. Karatas and Y. Bicen, “Nanoparticles for next-generation transformer insulating fluids: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p. 112645, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112645.
- [29] P. Trnka, Z. Mokra, J. Leffler, V. Mentlik, O. Michal, and J. Hornak, “Preparation and Testing of Biodegradable Nanofluids,” in *Diagnostika 2022 - 2022 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/Diagnostika55131.2022.9905076.
- [30] S. Mukherjee and S. Paria, “Preparation and Stability of Nanofluids-A Review.” [Online]. Available: www.iosrjournals.org
- [31] H. M. Ali, H. Babar, T. R. Shah, M. U. Sajid, M. A. Qasim, and S. Javed, “Preparation techniques of TiO₂ nanofluids and challenges: A review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 4. MDPI AG, Apr. 08, 2018. doi: 10.3390/app8040587.
- [32] G. J. Lee, C. K. Kim, M. K. Lee, and C. K. Rhee, “Characterization of ethylene glycol based TiO₂ nanofluid prepared by pulsed wire evaporation (PWE) method,” *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 28, no. 2, pp. 126–129, 2011.
- [33] G. J. Lee, C. K. Kim, M. K. Lee, C. K. Rhee, S. Kim, and C. Kim, “Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method,” *Thermochim Acta*, vol. 542, pp. 24–27, 2012, doi: 10.1016/j.tca.2012.01.010.
- [34] H. M. Lee, Y. R. Uhm, and C. K. Rhee, “Phase control and characterization of Fe and Fe-oxide nanocrystals synthesized by pulsed wire evaporation method,” *J Alloys Compd*, vol. 461, no. 1–2, pp. 604–607, 2008, doi: 10.1016/j.jallcom.2007.07.075.
- [35] J. S. Song, G. B. Cho, J. H. Ahn, and K. K. Cho, “Electrochemical properties of Sn/C nanoparticles fabricated by redox treatment and pulsed wire evaporation method,” *Appl Surf Sci*, vol. 415, pp. 14–18, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.12.157.

- [36] F. Yilmaz *et al.*, “Fabrication of cobalt nano-particles by pulsed wire evaporation method in nitrogen atmosphere,” *Powder Technol*, vol. 235, pp. 1047–1052, 2013, doi: 10.1016/j.powtec.2012.10.024.
- [37] X. xiu Huang and W. gong Zhang, “Study on successively preparation of nano-TiO₂ ethanol colloids by pulsed laser ablation and fluorescence property,” *Appl Surf Sci*, vol. 254, no. 11, pp. 3403–3407, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.apsusc.2007.11.027.
- [38] Y. Y. Wu and M. J. Kao, “Using TiO₂/DN nanofluid additive for engine lubrication oil,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 63, no. 6, pp. 440–445, 2011, doi: 10.1108/00368791111169025.
- [39] H. M. Ali, H. Babar, T. R. Shah, M. U. Sajid, M. A. Qasim, and S. Javed, “Preparation techniques of TiO₂ nanofluids and challenges: A review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 4, 2018, doi: 10.3390/app8040587.
- [40] A. Asadi *et al.*, “Effect of sonication characteristics on stability, thermophysical properties, and heat transfer of nanofluids: A comprehensive review,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 58. Elsevier B.V., Nov. 01, 2019. doi: 10.1016/j.ultsonch.2019.104701.
- [41] “Cavitation | physics | Britannica.” <https://www.britannica.com/science/cavitation> (accessed Mar. 09, 2023).
- [42] “When to Use a Magnetic Stirrer in the Lab | Labnet.” <https://www.labnetinternational.com/blog/2018/11/when-use-magnetic-stirrer> (accessed Mar. 09, 2023).
- [43] Lidmila. Bartovská and M. Šišková, *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [44] F. Yu *et al.*, “Dispersion stability of thermal nanofluids,” *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 27, no. 5. Elsevier B.V., pp. 531–542, Oct. 01, 2017. doi: 10.1016/j.pnsc.2017.08.010.
- [45] B. X. Du and X. L. Li, “Dielectric and thermal characteristics of vegetable oil filled with BN nanoparticles,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 2, pp. 956–963, Apr. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.005758.
- [46] “Aluminum Nitride | AlN Material Properties.” <https://accuratus.com/alumni.html> (accessed May 08, 2023).
- [47] “Aluminium Nitride / Aluminum Nitride (AlN).” <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=610> (accessed May 08, 2023).

- [48] H. S. Dow, W. S. Kim, and J. W. Lee, "Thermal and electrical properties of silicon nitride substrates," *AIP Adv*, vol. 7, no. 9, p. 95022, Sep. 2017, doi: 10.1063/1.4996314/937690.
- [49] "Silicon Nitride (Si₃N₄) Overview & Applications | SINTX Technologies." <https://sintx.com/materials/silicon-nitride/si3n4-applications/> (accessed May 08, 2023).
- [50] E. K. MENTLÍK V., M. BEČKA, V. BOČEK, V. KOČOVÁ, Z. KRAUS and J. RAIS, *Elektrotechnické materiály*. 1995.
- [51] "ČSN EN 60156, Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda".
- [52] V. Mentlik, "Dielektrické prvky a systémy,," 2006.
- [53] "ČSN EN 60247, Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele (tan delta) a rezistivity při stejnosměrném napětí".
- [54] B. J. Kubeš, "ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ DIPLOMOVÁ PRÁCE Nové elektroizolační kapaliny," 2017.
- [55] "ČSN EN ISO 12937 - Ropné výrobky - Stanovení vody - Coulometrická titrační metoda podle Karl Fischera".
- [56] "ČSN EN 62021-1, Izolační kapaliny - Stanovení čísla kyselosti - Část 1: Automatická potenciometrická titrace," 2004.
- [57] Diram, "Stanovení čísla kyselosti Obsah."
- [58] V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, and P. Trnka, *Diagnostika elektrických zařízení*, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [59] P. Kania, "Infračervená spektroskopie." VŠCHT Praha, 2014.
- [60] M. Hollein and V. Prokopec, "Infračervená spektroskopie." Nicolet CZ přednáška pro MMA, 2022.
- [61] "Pensky Marten Flash and fire Point Apparatus – Sun LabTek." <https://sunlabtech.com/pensky-marten-flash-and-fire-point-apparatus/> (accessed Apr. 25, 2023).
- [62] M. A. Abid, I. Khan, Z. Ullah, K. Ullah, A. Haider, and S. M. Ali, "Dielectric and thermal performance up-gradation of transformer oil using valuable nano-particles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 153509–153518, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2948959.

- [63] D. Liu, Y. Zhou, Y. Yang, L. Zhang, and F. Jin, "Characterization of high performance AIN nanoparticle-based transformer oil nanofluids; Characterization of high performance AIN nanoparticle-based transformer oil nanofluids," 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.005538.
- [64] "NanoAmor, Amorphous Products | Nanoscale Products | Nanopowder | Nanoparticles - Elements, Oxides, Carbides & Nitrides Nanoparticles." https://www.nanoamor.com/elements__oxides__carbides__nitrides_nanoparticles (accessed Apr. 26, 2023).
- [65] "Oleje rafinované | Výroba rostlinných olejů." <https://www.fabioprodukt.cz/oleje-rafinovane/#top> (accessed May 26, 2023).
- [66] Y. Lu, C. Du, L. Yuzhen, D. Changwen, S. Yanqiu, and Z. Jianmin, "Characterization of rapeseed oil using FTIR-ATR spectroscopy Structured illumination imaging modalities for food quality and safety detection View project Robot-assisted sensing and automation for characterization and monitoring for specialty crops View project Characterization of Rapeseed Oil Using FTIR-ATR Spectroscopy," *J Food Sci Eng*, vol. 4, pp. 244–249, 2014, doi: 10.17265/2159-5828/2014.05.004.
- [67] "Molecular structure of a vegetable oil (example applies for rapeseed... | Download Scientific Diagram." https://www.researchgate.net/figure/Molecular-structure-of-a-vegetable-oil-example-applies-for-rapeseed-oil-All-double_fig1_223370968 (accessed May 08, 2023).
- [68] "Informace o vakuu | ACTIVAIR." <https://www.activair.cz/cz/technicke-informace/informace-o-vakuu> (accessed May 26, 2023).
- [69] "Pfiffner Group; Current and voltage – our passion." https://update.haefely.com/ct2830/_private/MA_2830_2831_4843477_V2.0.pdf (accessed May 08, 2023).
- [70] J. H. Limón-Pacheco *et al.*, "Astrocytes are more vulnerable than neurons to silicon dioxide nanoparticle toxicity in vitro," *Toxics*, vol. 8, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.3390/TOXICS8030051.
- [71] "Zinc Oxide (ZnO) Nanopowder/Nanoparticles." https://nanografi.com/nanoparticles/zinc-oxide-zno-nanopowder-nanoparticles-purity-99-5-size-30-50-nm/?utm_term=&utm_campaign=Leads-Performance+Max-1&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=1992861092&hsa_cam=16558185765&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad=1&gclid=Cj0KCQjwu-KiBhCsARIsAPztUF2o-

9IJLMwzzaLYHnPBthHmLCTszwPchee16aKjcOa7IP0qIxgrebkaAm5hEALw_wc
B (accessed May 08, 2023).

- [72] “Silicon nitride nanopowder, APS 25±5 nm.” <https://shop.plasmachem.com/non-oxide-nanoparticles/79-474-silicon-nitride-nanopowder-aps-255-nm.html#/31-weight-25g> (accessed May 08, 2023).

Přílohy

Seznam příloh:

- 1. Přeskokové napětí**
- 2. Relativní permitivita a ztrátový činitel**
- 3. Rezistivita**
- 4. Dynamická viskozita čisté řepky**

1. Přeskokové napětí

| Přeskokové napětí | Čistá řepka | SiN | BN | AlN | SiO₂ | TiO₂ | ZnO |
|------------------------------|------------------------|------------|-----------|------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 | 31,48 | 48,9 | 45,9 | 45,48 | 73,62 | 85,16 | 60,9 |
| 2 | 54,31 | 53,58 | 39,65 | 29,09 | 74,82 | 61,22 | 59,23 |
| 3 | 59,39 | 41,31 | 42,2 | 54,23 | 68,16 | 66,44 | 66,83 |
| 4 | 69,31 | 28,14 | 41,9 | 28,91 | 63,24 | 67,66 | 59,87 |
| 5 | 44,80 | 55,03 | 37,15 | 42,05 | 61,25 | 67,31 | 73,12 |
| 6 | 56,65 | 44,39 | 43,13 | 36,38 | 67,68 | 61,56 | 68,77 |

2. Relativní permitivita a ztrátový činitel

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – ČISTÁ ŘEPKA | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 499,9 | 50,0 | 0,00106 | 195,17 | 0,250 | 3,253 | 27,9 | 29,2 | 42,4 |
| 499,9 | 50,1 | 0,00115 | 193,44 | 0,250 | 3,224 | 30,0 | 29,3 | 42,2 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00194 | 191,66 | 0,250 | 3,194 | 40,0 | 29,6 | 41,4 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00308 | 189,31 | 0,250 | 3,155 | 50,0 | 29,8 | 41,1 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00561 | 187,38 | 0,250 | 3,123 | 60,0 | 30,0 | 40,9 |
| 499,9 | 50,1 | 0,01010 | 184,64 | 0,250 | 3,077 | 70,0 | 30,2 | 40,4 |
| 500,0 | 50,1 | 0,01750 | 181,18 | 0,250 | 3,020 | 80,0 | 30,4 | 40,2 |
| 500,0 | 50,1 | 0,03040 | 177,34 | 0,250 | 2,956 | 90,0 | 30,5 | 38,8 |
| 500,0 | 50,1 | 0,03060 | 177,32 | 0,250 | 2,955 | 90,1 | 30,5 | 38,9 |

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – SiN | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 499,8 | 50,0 | 0,00055 | 185,61 | 0,250 | -- | 22,8 | 25,0 | 28 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00054 | 187,11 | 0,250 | 2,942 | 22,8 | 25,2 | 27,9 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00068 | 184,5 | 0,250 | 2,912 | 30 | 25,4 | 28 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00102 | 181,89 | 0,250 | 2,87 | 40 | 25,6 | 28,4 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00150 | 179,31 | 0,250 | 2,829 | 50 | 25,8 | 28,6 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00213 | 178,93 | 0,250 | 2,79 | 60 | 25,8 | 28,3 |
| 499,8 | 50,1 | 0,00295 | 176,5 | 0,250 | 2,752 | 70 | 25,9 | 28,4 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00400 | 173,73 | 0,250 | 2,715 | 80 | 26,0 | 28,1 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00541 | 173,68 | 0,250 | 2,68 | 90 | 26,0 | 28,3 |

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – BN | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 500,2 | 50,1 | 0,00454 | 211,48 | 0,250 | 2,944 | 30,2 | 26,2 | 29,8 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00508 | 205,8 | 0,250 | 2,899 | 40 | 26,2 | 30,1 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00643 | 199,88 | 0,250 | 2,856 | 50 | 26,2 | 30,4 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00789 | 194,78 | 0,250 | 2,848 | 60 | 26,2 | 30,4 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00973 | 189,78 | 0,250 | 2,820 | 70 | 26,2 | 30,4 |
| 500,1 | 50,1 | 0,0140 | 185,06 | 0,250 | 2,738 | 80 | 26,2 | 30,4 |
| 500,1 | 50,1 | 0,0192 | 180,26 | 0,250 | 2,702 | 90 | 26,3 | 30,3 |

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – AlN | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 499,3 | 50,1 | 0,00118 | 191 | 0,250 | -- | 23,9 | 24,7 | 31,8 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00123 | 190,57 | 0,250 | 3,084 | 24,9 | 24,8 | 31,8 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00158 | 189,34 | 0,250 | 3,064 | 30,1 | 24,9 | 31,6 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00286 | 186,36 | 0,250 | 3,016 | 40,3 | 25,2 | 31,4 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00444 | 183,71 | 0,250 | 2,973 | 50,0 | 25,3 | 31,1 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00717 | 180,95 | 0,250 | 2,928 | 60,1 | 25,5 | 31,2 |
| 500,2 | 50,1 | 0,01030 | 178,12 | 0,250 | 2,882 | 70,2 | 25,7 | 31,2 |
| 500,2 | 50,1 | 0,01690 | 175,41 | 0,250 | 2,838 | 80,0 | 25,8 | 30,8 |
| 499,9 | 50,1 | 0,02630 | 172,75 | 0,250 | 2,795 | 90,2 | 25,9 | 30,6 |

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – SiO ₂ | | | | | | | | |
|---|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 500,0 | 50,1 | 0,00489 | 182,60 | 0,250 | 2,955 | 33,6 | 25,5 | 16 |
| 500,2 | 50,0 | 0,00514 | 181,00 | 0,250 | 2,929 | 40,0 | 25,8 | 16,5 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00578 | 178,35 | 0,250 | 2,886 | 50,0 | 26,0 | 16,7 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00854 | 175,95 | 0,250 | 2,847 | 59,9 | 26,0 | 16,1 |
| 500,0 | 50,1 | 0,01260 | 173,50 | 0,250 | 2,807 | 70,0 | 26,0 | 16 |
| 500,1 | 50,1 | 0,01400 | 171,17 | 0,250 | 2,770 | 80,0 | 26,0 | 16,3 |
| 500,1 | 50,1 | 0,0175 | 169,10 | 0,250 | 2,736 | 89,9 | 26,1 | 15,8 |

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – TiO ₂ | | | | | | | | |
|---|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 500,1 | 50,1 | 0,00129 | 190,06 | 0,250 | 3,075 | 24,8 | 24,5 | 31,5 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00101 | 188,59 | 0,250 | 3,052 | 29,6 | 24,7 | 31,4 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00101 | 188,59 | 0,250 | 3,052 | 29,6 | 24,7 | 31,4 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00100 | 188,45 | 0,250 | 3,049 | 30,1 | 24,7 | 31,5 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00098 | 187,84 | 0,250 | 2,977 | 31,2 | 24,7 | 31,5 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00119 | 185,24 | 0,250 | 2,936 | 40,0 | 25,0 | 31,2 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00168 | 182,43 | 0,250 | 2,891 | 50,0 | 25,3 | 31,6 |
| 500,3 | 50,1 | 0,00239 | 179,73 | 0,25 | 2,848 | 60,2 | 25,5 | 31,8 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00345 | 177,42 | 0,25 | 2,812 | 70,0 | 25,6 | 32,1 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00498 | 175,03 | 0,25 | 2,774 | 80,0 | 25,6 | 31,9 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00704 | 172,99 | 0,25 | 2,741 | 89,9 | 25,7 | 30,9 |
| 500,1 | 50,1 | 0,00704 | 172,98 | 0,25 | 2,741 | 90,0 | 25,7 | 30,9 |

| ZTRÁTOVÝ ČINITEL / PERMITIVITA – ZnO | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------|--------------|---------|-----------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Urms [V] | Frekvence [Hz] | tan δ | Cx [pF] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Permitivita | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 499,9 | 50,1 | 0,00250 | 181,88 | 0,250 | 2,882 | 24,8 | 24,7 | 31,6 |
| 500,0 | 50,1 | 0,00308 | 180,71 | 0,250 | 2,864 | 30,0 | 24,9 | 31,4 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00435 | 178,22 | 0,250 | 2,824 | 40,0 | 25,3 | 31,0 |
| 500,1 | 50,0 | 0,00591 | 175,67 | 0,250 | 2,784 | 50,1 | 25,5 | 30,6 |
| 500,2 | 50,1 | 0,00795 | 173,25 | 0,250 | 2,746 | 60,0 | 25,8 | 30,5 |
| 500,1 | 50,1 | 0,01050 | 170,85 | 0,250 | 2,708 | 70,0 | 26,0 | 30,5 |
| 500,1 | 50,1 | 0,01400 | 168,51 | 0,250 | 2,671 | 80,0 | 26,1 | 30,4 |
| 499,9 | 50,0 | 0,01840 | 166,35 | 0,250 | 2,636 | 90,0 | 26,3 | 30,6 |

3. Rezistivita

| REZISTIVITA – čistá řepka | | | | | | |
|---------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 867 | 4,34 | 0,277 | 90,2 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 919 | 4,10 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 900 | 4,18 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 891 | 4,22 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 885 | 4,25 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 881 | 4,27 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 880 | 4,28 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 877 | 4,29 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 875 | 4,30 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 876 | 4,30 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 874 | 4,31 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,8 |
| 555,0 | 873 | 4,31 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 871 | 4,32 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 871 | 4,32 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 870 | 4,33 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 869 | 4,33 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 869 | 4,33 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 869 | 4,33 | 0,278 | 90,3 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 867 | 4,34 | 0,278 | 90,2 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 866 | 4,35 | 0,278 | 90,2 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 866 | 4,35 | 0,278 | 90,2 | 30,5 | 38,7 |
| 555,0 | 866 | 4,35 | 0,278 | 90,2 | 30,5 | 38,7 |

| REZISTIVITA – AIN | | | | | | |
|-------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 500 | 7,75 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 491 | 7,89 | 0,277 | 90,1 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 459 | 8,45 | 0,277 | 90,1 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 437 | 8,87 | 0,277 | 90,1 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 427 | 9,08 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 424 | 9,15 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 420 | 9,22 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 417 | 9,29 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 414 | 9,36 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 414 | 9,36 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 411 | 9,43 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 408 | 9,50 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 405 | 9,57 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 402 | 9,64 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 399 | 9,71 | 0,277 | 89,9 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 399 | 9,78 | 0,277 | 89,8 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 396 | 9,85 | 0,277 | 89,8 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 394 | 9,85 | 0,277 | 89,8 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 391 | 9,92 | 0,277 | 89,8 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 388 | 9,99 | 0,277 | 89,7 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 388 | 9,99 | 0,277 | 89,7 | 26,1 | 30,9 |
| 555,0 | 388 | 9,99 | 0,277 | 89,7 | 26,1 | 30,9 |

| REZISTIVITA – ZnO | | | | | | |
|-------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 444 | 8,91 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 455 | 8,70 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 434 | 9,13 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 424 | 9,34 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 417 | 9,48 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 414 | 9,55 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 411 | 9,63 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 408 | 9,70 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 408 | 9,70 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 405 | 9,77 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 405 | 9,77 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 405 | 9,77 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 402 | 9,84 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 402 | 9,84 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 402 | 9,84 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 402 | 9,84 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 402 | 9,84 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 399 | 9,91 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 399 | 9,91 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 399 | 9,91 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |
| 555,0 | 399 | 9,91 | 0,277 | 90,2 | 26,4 | 30,5 |

| REZISTIVITA – SiN | | | | | | |
|-------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 773 | 28,77 | 0,278 | 90,1 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 807 | 33,1 | 0,277 | 90,1 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 775 | 36,59 | 0,277 | 90,1 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 759 | 39,53 | 0,277 | 90,1 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 746 | 41,9 | 0,277 | 90,1 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 737 | 43,72 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 730 | 45,04 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 723 | 46,02 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 719 | 46,86 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 714 | 47,56 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 710 | 48,12 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 707 | 48,6 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 703 | 48,95 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 700 | 49,3 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 697 | 49,58 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 694 | 49,86 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 691 | 50,07 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 688 | 50,28 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 687 | 50,42 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 687 | 50,63 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 687 | 50,84 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |
| 555,0 | 687 | 50,84 | 0,277 | 90,2 | 26,0 | 28,1 |

| REZISTIVITA – SiO ₂ | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 152 | 25,56 | 0,278 | 90,0 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 139 | 27,93 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 126 | 30,80 | 0,278 | 90,0 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 117 | 33,24 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 109 | 35,48 | 0,277 | 90,0 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 104 | 37,36 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 99 | 39,11 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 95 | 40,78 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 92 | 42,32 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 89 | 43,79 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 86 | 45,18 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 83 | 46,44 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 81 | 47,63 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 80 | 48,74 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 78 | 49,79 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 76 | 50,77 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 75 | 51,68 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 74 | 52,52 | 0,277 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 73 | 53,35 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 72 | 54,12 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 71 | 54,89 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |
| 555,0 | 70 | 55,59 | 0,278 | 90,1 | 26,1 | 15,8 |

| REZISTIVITA – BN | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 433 | 8,94 | 0,278 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 420 | 9,22 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 388 | 9,99 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 365 | 10,61 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 347 | 11,17 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 332 | 11,66 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 321 | 12,08 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 312 | 12,43 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 302 | 12,85 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 294 | 13,20 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 286 | 13,55 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 279 | 13,90 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 272 | 14,25 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 267 | 14,53 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 261 | 14,87 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 255 | 15,22 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 248 | 15,64 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 243 | 15,92 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 239 | 16,27 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 233 | 16,62 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |
| 555,0 | 233 | 16,62 | 0,277 | 90,1 | 26,3 | 30,3 |

| REZISTIVITA – TiO ₂ | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| DC napětí [V] | DC proud [nA] | Rezistivita [GΩm] | Elektrické namáhání [kV/mm] | Izolační teplota [°C] | Teplota okolí [°C] | Relativní vlhkost [%] |
| 555,0 | 145,0 | 27,2 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 128,0 | 30,8 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 118,0 | 33,5 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 109,0 | 36,2 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 103,0 | 38,5 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 97,0 | 40,8 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 92,0 | 42,9 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 88,0 | 44,9 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 85,0 | 46,8 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 82,0 | 48,4 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 80,0 | 49,8 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 77,0 | 51,1 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 76,0 | 52,3 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 74,0 | 53,3 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 73,0 | 54,3 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 72,0 | 55,3 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 71,0 | 56,1 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 69,0 | 57,0 | 0,277 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 69,0 | 57,8 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 68,0 | 58,5 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 67,0 | 59,2 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |
| 555,0 | 67,0 | 59,2 | 0,278 | 90,1 | 25,7 | 30,9 |

4. Dynamická viskozita čisté řepky

| Dynamická viskozita – čistá řepka | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| Teplota (°C) | Dynamická viskozita (mPas) | Teplota (°C) | Dynamická viskozita (mPas) | Teplota (°C) | Dynamická viskozita (mPas) | Teplota (°C) | Dynamická viskozita (mPas) |
| 21,94 | 59,10 | 25,43 | 50,30 | 31,05 | 39,92 | 36,46 | 32,53 |
| 21,90 | 59,18 | 25,57 | 49,98 | 31,17 | 39,73 | 36,56 | 32,44 |
| 21,87 | 59,28 | 25,72 | 49,68 | 31,29 | 39,57 | 36,65 | 32,32 |
| 21,85 | 59,29 | 25,86 | 49,35 | 31,41 | 39,41 | 36,75 | 32,22 |
| 21,84 | 59,32 | 25,99 | 49,07 | 31,52 | 39,26 | 36,87 | 32,06 |
| 21,87 | 59,29 | 26,12 | 48,79 | 31,63 | 39,09 | 37,01 | 31,89 |
| 21,93 | 59,14 | 26,25 | 48,53 | 31,73 | 38,95 | 37,15 | 31,66 |
| 22,00 | 58,96 | 26,38 | 48,26 | 31,83 | 38,82 | 37,31 | 31,43 |
| 22,09 | 58,72 | 26,50 | 48,03 | 31,92 | 38,70 | 37,48 | 31,19 |
| 22,18 | 58,47 | 26,62 | 47,81 | 32,02 | 38,54 | 37,66 | 30,97 |
| 22,27 | 58,20 | 26,74 | 47,58 | 32,11 | 38,44 | 37,84 | 30,73 |
| 22,37 | 57,92 | 26,85 | 47,38 | 32,20 | 38,31 | 38,03 | 30,54 |
| 22,47 | 57,67 | 26,96 | 47,18 | 32,30 | 38,18 | 38,22 | 30,32 |
| 22,56 | 57,42 | 27,07 | 46,98 | 32,42 | 38,04 | 38,40 | 30,12 |
| 22,65 | 57,16 | 27,17 | 46,78 | 32,56 | 37,78 | 38,58 | 29,94 |
| 22,75 | 56,92 | 27,27 | 46,62 | 32,70 | 37,53 | 38,76 | 29,77 |
| 22,83 | 56,67 | 27,37 | 46,47 | 32,86 | 37,24 | 38,93 | 29,60 |
| 22,92 | 56,43 | 27,46 | 46,32 | 33,03 | 36,95 | 39,09 | 29,40 |
| 23,00 | 56,23 | 27,55 | 46,13 | 33,20 | 36,66 | 39,26 | 29,27 |
| 23,08 | 56,02 | 27,64 | 45,96 | 33,38 | 36,41 | 39,42 | 29,09 |
| 23,16 | 55,81 | 27,75 | 45,73 | 33,55 | 36,14 | 39,57 | 28,97 |
| 23,24 | 55,62 | 27,89 | 45,55 | 33,73 | 35,91 | 39,71 | 28,84 |
| 23,31 | 55,43 | 28,03 | 45,29 | 33,91 | 35,65 | 39,85 | 28,70 |
| 23,38 | 55,25 | 28,20 | 44,91 | 34,08 | 35,42 | 39,98 | 28,56 |
| 23,45 | 55,08 | 28,37 | 44,54 | 34,25 | 35,16 | 40,11 | 28,47 |
| 23,52 | 54,92 | 28,54 | 44,17 | 34,42 | 34,94 | | |
| 23,59 | 54,77 | 28,71 | 43,86 | 34,58 | 34,75 | | |
| 23,65 | 54,62 | 28,89 | 43,50 | 34,74 | 34,56 | | |
| 23,71 | 54,48 | 29,06 | 43,16 | 34,89 | 34,39 | | |
| 23,78 | 54,29 | 29,23 | 42,84 | 35,04 | 34,17 | | |
| 23,86 | 54,13 | 29,41 | 42,53 | 35,19 | 33,99 | | |
| 23,95 | 53,92 | 29,58 | 42,24 | 35,33 | 33,86 | | |
| 24,07 | 53,70 | 29,74 | 41,97 | 35,46 | 33,70 | | |
| 24,20 | 53,36 | 29,90 | 41,68 | 35,59 | 33,53 | | |
| 24,35 | 52,98 | 30,06 | 41,43 | 35,71 | 33,40 | | |
| 24,51 | 52,56 | 30,22 | 41,16 | 35,83 | 33,26 | | |
| 24,67 | 52,17 | 30,36 | 40,94 | 35,95 | 33,13 | | |
| 24,82 | 51,79 | 30,51 | 40,72 | 36,06 | 33,00 | | |
| 24,98 | 51,39 | 30,65 | 40,49 | 36,17 | 32,87 | | |
| 25,13 | 51,04 | 30,79 | 40,31 | 36,27 | 32,76 | | |
| 25,28 | 50,66 | 30,92 | 40,08 | 36,37 | 32,66 | | |

