



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

STUDIUM VLASTNOSTÍ ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

STUDY OF ALTERNATIVE ELECTROINSULATING LIQUIDS PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

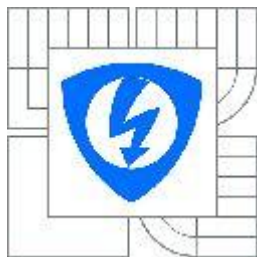
TOMÁŠ BANNERT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Tomáš Bannert

ID: 158632

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Studium vlastností alternativních elektroizolačních materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s požadavky kladenými na vlastnosti elektroizolačních olejů v technické praxi. Zpracujte literární rešerši o současném stavu v oblasti diagnostiky a použití přírodních esterů v elektrotechnickém průmyslu, včetně srovnání jejich vlastností s minerálními oleji. Vytvořte přehled a prostudujte fyzikální podstatu diagnostických metod používaných pro stanovení dynamické viskozity a elektrických vlastností charakterizujících kapalně elektroizolační materiály.

Na vybraných vzorcích elektroizolačních kapalin, rostlinných olejů a zejména jejich jednotlivých složek v podobě vyšších mastných kyselin a esterů, proměřte teplotní závislosti viskozity, hustoty a složek komplexní permitivity. Výsledné průběhy matematicky aproximujte a dosažené hodnoty vybraných materiálových veličin u alternativních kapalin a jejich složek porovnejte s hodnotami obvyklými pro minerální oleje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10. 2. 2015

Termín odevzdání: 4. 6. 2015

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem vlastností alternativních elektroizolačních materiálů používaných v elektrotechnickém průmyslu, konkrétně kapalin na bázi přírodních esterů a zejména jejich složek v podobě vyšších mastných kyselin a esterů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se práce zabývá charakterizací rostlinných olejů, jejich složek a minerálních olejů, jejich srovnáním z pohledu elektrických a neelektrických vlastností a současným stavem využití rostlinných olejů a jejich složek v elektrotechnickém průmyslu. Dále pak rozborem metod diagnostiky těchto vlastností. V experimentální části byly u vybraných vzorků rostlinných olejů, jejich složek a vybraných vzorků minerálních olejů analyzovány elektrické a neelektrické vlastnosti hustota a dynamická viskozita a komplexní permitivita a její složky relativní permitivita a ztrátové číslo. Vyhodnocené výsledky jednotlivých skupin jsou porovnány mezi sebou.

Klíčová slova

Rostlinné oleje, minerální oleje, syntetické oleje, biologicky odbouratelné kapaliny, přírodní estery, elektrické vlastnosti kapalin, neelektrické vlastnosti kapalin, hustota, dynamická viskozita, zdánlivá viskozita, komplexní permitivita, relativní permitivita, ztrátové číslo, ztrátový činitel, pyknometr, mohrovy vážky, viskozimetr, dutinový rezonátor, rýžový olej, superolein, kyselina olejová, methyl laurate, methyl stearate, methyl palmitate, ethyl linoleate, Trafo CZ-A, Trafo NA, HM 46 SYNT, Silikon oil M 350.

Abstract

This bachelor's thesis is dealing with the study of alternative electrical insulating properties of the materials used in the electronics industry, particularly liquids based on natural esters and especially their constituents in the form of higher fatty acids and esters. The work is divided into theoretical and practical part. The theoretical part deals with the characterization of vegetable oils, their constituents and mineral oils, their comparison in terms of electrical and non-electrical properties and current state of the use of vegetable oils and their constituents in the electronics industry. Further it's dealing with analysis of diagnostic methods for these characteristics. In the experimental part were analyzed electrical and non-electrical properties of selected samples of vegetable oils, their constituents and mineral oils such as the density, the dynamic viscosity and the complex permittivity and its parts as relative permittivity and loss number. Evaluations of the results of each group are compared with each other.

Key words

Vegetable oils, mineral oils, synthetic oils, biodegradable fluids, natural esters, electrical properties of fluids, non-electrical properties of liquids, density, dynamic viscosity, apparent viscosity, complex permittivity, relative permittivity, loss number, loss factor, pycnometer, Westphal balance, viscometer, cavity resonator, rice bran oil, superolein, oleic acid, methyl laurate, methyl stearate, methyl palmitate, ethyl linoleate, Trafo CZ-A, Trafo NA, HM 46 SYNT, Silicon oil M 350.

Bibliografická citace díla:

BANNERT, T. Studium vlastností alternativních elektroizolačních materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. 6. 2015

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

Obsah

Úvod.....	1
1 Rostlinné a minerální oleje	2
1.1 Charakterizace rostlinných olejů	2
1.1.1 Nevysychavé rostlinné oleje.....	2
1.1.2 Vysychavé rostlinné oleje	2
1.2 Příklad běžně dostupných rostlinných olejů.....	3
1.2.1 Řepkový olej	3
1.2.2 Rýžový olej	3
1.2.3 Ricinový olej	3
1.2.4 Slunečnicový olej	3
1.2.5 Sojový olej rafinovaný	3
1.2.6 Palmový olej.....	3
1.2.7 Olivový olej.....	4
1.3 Charakterizace vybraných složek rostlinných olejů	4
1.3.1 Methyl palmitát	4
1.3.2 Methyl stearát	4
1.3.3 Ethyl linoleát	5
1.3.4 Methyl laurát	5
1.3.5 Kyselina olejová.....	5
1.4 Charakterizace minerálních olejů	6
1.4.1 Parafinické.....	6
1.4.2 Naftenické	6
1.4.3 Aromatické	6
1.5 Významné vlastnosti minerálních a rostlinných olejů.....	7
1.5.1 Průrazné napětí	7
1.5.2 Vnitřní rezistivita.....	7
1.5.3 Komplexní permitivita	7
1.5.4 Ztrátový činitel	7
1.5.5 Přítomnost vody v oleji	7
1.5.6 Bod vzplanutí	8
1.5.7 Bod tuhnutí	8
1.5.8 Barva	8

1.5.9	Viskozita.....	8
1.6	Současný stav v diagnostice a použití rostlinných olejů	9
1.6.1	Vliv viskozity a obsahu vody na elektrickou pevnost rostlinných olejů	9
1.6.2	Elektrické a fyzikálně-chemické vlastnosti směsí minerálních a rostlinných olejů. 9	
1.6.3	Vliv materiálu elektrody na měření vodivosti působením DC pole.....	10
2	Metody měření některých vlastností	11
2.1	Metody měření hustoty	11
2.1.1	Metoda měření hustoty kapalin pomocí pyknometru.....	11
2.1.2	Metoda měření hustoty kapalin Mohrovými vážkami	12
2.1.3	Metoda měření hustoty kapalin hustoměrem	13
2.1.4	Metoda měření hustoty kapalin Archimédovou metodou	13
2.2	Metody měření viskozity	14
2.2.1	Metoda měření viskozity kapilárním viskozimetrem.....	14
2.2.2	Metoda měření viskozity padajícím tělískem.....	15
2.2.3	Metoda měření viskozity rotačním viskozimetrem	15
2.2.4	Metoda měření viskozity vibračním viskozimetrem	16
2.3	Metody měření permitivity	17
2.3.1	Metoda měření permitivity pomocí dutinových rezonátorů.....	17
2.3.2	Metoda měření permitivity ve volném prostoru.....	18
2.3.3	Měření pomocí můstkové metody	18
3	Praktická část – měření	19
3.1	Měření hustoty	19
3.1.1	Průběh měření	19
3.2	Měření viskozity	23
3.2.1	Průběh měření	23
3.3	Měření permitivity a ztrátového činitele	27
3.3.1	Průběh měření	27
3.3.1.1	Rýžový olej.....	28
3.3.1.2	Superolein	29
3.3.1.3	Kyselina olejová	30
3.3.1.4	Methyl laurát.....	31
3.3.1.5	Methyl stearát	32
3.3.1.6	Methyl palmitát.....	33

3.3.1.7 Ethyl linoleát.....	34
3.3.1.8 Trafo CZ-A	35
3.3.1.9 Trafo NA.....	36
3.3.1.10 HM 46 SYNT.....	37
3.3.1.11 Silikon oil M 350	38
Závěr.....	39
Seznam použité literatury	40

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Strukturní vzorec methyl palmitátu	4
Obrázek 2 – Strukturní vzorec methyl stearátu	4
Obrázek 3 – Strukturní vzorec ethyl linoleátu.....	5
Obrázek 4 – Strukturní vzorec methyl laurátu	5
Obrázek 5 – Strukturní vzorec kyseliny olejové	5
Obrázek 6 - Tabulka procentuálního obsahu minerálního a rostlinného oleje v jednotlivých vzorcích	9
Obrázek 7 - Závislost hustoty a ztrátového činitele na poměru minerálního a rostlinného oleje v jednotlivých vzorcích	10
Obrázek 8 – Pyknometr	12
Obrázek 9 - Mohrovy vážky.....	12
Obrázek 10 – Hustoměr.....	13
Obrázek 11 - váhy užívané k měření hustoty archimédovou metodou	13
Obrázek 12 - Ubbelohdeův kapilární viskozimetr	14
Obrázek 13 - Höpplerův viskozimetr	15
Obrázek 14 - Schéma rotačního viskozimetru kužel-deska	16
Obrázek 15 - Schéma rotačního viskozimetru se dvěma soustřednými válci	16
Obrázek 16 - vibrační viskozimetr od firmy A&D	16
Obrázek 17 - Graf teplotní závislosti hustoty měřených rostlinných olejů.....	20
Obrázek 18 - Graf teplotní závislosti hustoty měřených složek rostlinných olejů.....	21
Obrázek 19 - Graf teplotní závislosti hustoty měřených minerálních olejů.....	22
Obrázek 20 - Graf teplotní závislosti měřených rostlinných olejů.....	24
Obrázek 21 - Graf teplotní závislosti měřených složek rostlinných olejů	25
Obrázek 22 - Graf teplotní závislosti viskozity měřených minerálních olejů.....	26
Obrázek 23 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity rýžového oleje.....	28
Obrázek 24 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele rýžového oleje	28
Obrázek 25 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla rýžového oleje.....	28
Obrázek 26 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity palmového oleje.....	29
Obrázek 27 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele palmového oleje	29
Obrázek 28 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla palmového oleje.....	29
Obrázek 29 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity kyseliny olejové	30
Obrázek 30 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele kyseliny olejové.....	30
Obrázek 31 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla kyseliny olejové.....	30
Obrázek 32 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity methyl laurátu	31
Obrázek 33 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele methyl laurátu.....	31
Obrázek 34 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla methyl laurátu	31
Obrázek 35 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity methyl stearátu.....	32
Obrázek 36 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele methyl stearátu	32
Obrázek 37 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla methyl stearátu.....	32
Obrázek 38 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity methyl palmitátu	33
Obrázek 39 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele methyl palmitátu.....	33
Obrázek 40 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla methyl palmitátu	33
Obrázek 41 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity ethyl linoleátu	34

Obrázek 42 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele ethyl linoleátu.....	34
Obrázek 43 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla ethyl linoleátu	34
Obrázek 44 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje Trafo CZ-A	35
Obrázek 45 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje Trafo CZ-A.....	35
Obrázek 46 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje Trafo CZ-A	35
Obrázek 47 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje Trafo NA	36
Obrázek 48 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje Trafo NA	36
Obrázek 49 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje Trafo NA.....	36
Obrázek 50 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje HM 46 SYNT.	37
Obrázek 51 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje HM 46 SYNT ...	37
Obrázek 52 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje HM 46 SYNT.....	37
Obrázek 53 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje Silikon oil M 350	38
Obrázek 54 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje Silikon oil M 350	38
Obrázek 55 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje Silikon oil M 350 ..	38

Úvod

Každý z nás se již setkal s rostlinnými oleji. K jejich využití v běžném životě dochází především v potravinářském průmyslu, případně v domácnostech na pečení nebo jako přísady do jídel. Mimo jiné nacházejí své uplatnění v kosmetice, ve farmaceutickém průmyslu nebo jako paliva ve formě takzvané bionafty. Další významné využití nacházejí rostlinné oleje v elektrotechnice. Lze je použít jako izolační nebo chladicí médium v transformátorech, jako náplně do kondenzátorů, kde se používají jako impregnace papírového dielektrika nebo syntetické folie. Dále se využívají jako ochrana tuhých izolantů před vnějšími vlivy, jako je vlhkost nebo vzduch.

Jedním z hlavních důvodů proč elektrotechnický průmysl zkoumá vlastnosti rostlinných olejů a snaží se jimi nahradit minerální a syntetické oleje, je jejich netoxičita a dobrá biologická odbouratelnost a tudíž šetrnost k životnímu prostředí. Navíc pocházejí ze snadno obnovitelných zdrojů. Při realizaci těchto pokusů je ovšem nutné dbát na zachování standardně požadovaných vlastností jako jsou: vysoká rezistivita, vysoká elektrická pevnost, nízká permitivita, vysoké průrazné napětí, vysoký bod vzplanutí, nízký bod tuhnutí, hustota, viskozita, dlouhodobá stabilita vlastností a podobně. Dalším důležitým faktorem je požadavek na co nejnižší cenu. Aby bylo možné oleje na ropné bázi, které jsou k životnímu prostředí agresivnější, nahradit oleji rostlinnými, je nutné je prozkoumat ve všech oblastech vlastností a to jak elektrických, tak i neelektrických.

Tato bakalářská práce se bude zabývat některými neelektrickými a elektrickými vlastnostmi a to hustotou, viskozitou, komplexní permitivitou a jejími složkami vzorků některých rostlinných olejů, některých jejich složek a některých minerálních a syntetických olejů, předložených k analýze. Tyto vlastnosti budou testovány v laboratorních podmínkách na přesných měřicích přístrojích. K tomuto účelu bylo sestaveno měřicí pracoviště, na kterém bude testování probíhat.

1 Rostlinné a minerální oleje

Zásadní rozdíl mezi rostlinnými a minerálními oleji spočívá v jejich získávání. Minerální oleje se získávají destilací z ropy, kdežto rostlinné oleje jsou získávány lisováním semen, plodů nebo jiných částí rostlin. Zatímco minerální oleje jsou složeny především z alkanů a cyklických parafinů, základní strukturu rostlinných olejů tvoří triglyceridy, což jsou estery vyšších mastných kyselin s glycerolem. Díky svému složení jsou rostlinné oleje netoxické a snadno biologicky odbouratelné. To je bohužel na úkor některých dalších vlastností. Minerální oleje si zachovávají nízkou viskozitu a nízkou hustotu ve větším rozsahu teplot, nižší relativní permitivitu ve větším frekvenčním a teplotním rozsahu a neprojevuje se u nich stárnutí v takové míře jako u rostlinných olejů.

1.1 Charakterizace rostlinných olejů

Rostlinné oleje jsou sloučeniny glycerolu a tří řetězců mastných kyselin. Čím větší počet nenasyčených vazeb tyto mastné kyseliny mají, tím je olej tekutější. Oleje jsou zásobní látky rostlin, ukládají se hlavně v plodech a semenech, ale i v jiných částech rostlin. Oproti živočišným tukům mají rostlinné mnohem větší podíl nenasyčených mastných kyselin, výjimkou jsou palmový, palmojádrový a kokosový olej, u kterých převažují nasycené mastné kyseliny.[1]

Rostlinné oleje se získávají převážně ze semen a plodů rostlin například z řepky, kukuřice, sóji, skočce obecného (ricin), plodů olivovníku atd. Rostlinné oleje jsou šetrná alternativa k minerálním olejům, protože jsou snadno biologicky odbouratelné a mají mazací vlastnosti podobné minerálním olejům. Oproti minerálním olejům však mají tu nevýhodu, že mají nízkou odolnost vůči oxidaci a nízkým teplotám.[2] Další velkou nevýhodou je absorpce vody za nízkých teplot, oleje potom vykazují horší vlastnosti.[3]

V elektrotechnice se nejčastěji používají jako impregnace do papírových kondenzátorů, na výrobu elektrotechnických laků, aditiv a v současné době i jako chlazení u výkonových transformátorů.[3]

Rostlinné oleje se mimo jiné dělí na vysychavé a nevysychavé.

1.1.1 Nevysychavé rostlinné oleje

Je to skupina olejů, která na vzduchu zachovává své tekuté vlastnosti. Díky tomu se používají k napouštění papírových kondenzátorů a jako kapalné izolanty. Patří sem řepkový olej, ricinový olej, slunečnicový olej a olivový olej.

1.1.2 Vysychavé rostlinné oleje

Oproti nevysychavým olejům, vysychavé své tekuté vlastnosti na vzduchu či působením tepla ztrácejí, tedy tvrdnou. V tomto stavu mají dobré elektrické vlastnosti, vysokou odolnost vůči rozpouštědlům a neměknou při zahřívání. Patří sem lněný olej, makový olej, dřevný olej nebo slunečnicový olej.

1.2 Příklad běžně dostupných rostlinných olejů

Rostlinných olejů existuje velké množství druhů podle toho, z jaké rostliny jsou získávány a každý z nich má různé elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti.

1.2.1 Řepkový olej

Olej získaný ze semen řepky olejné. Je lisovaný buď pomocí organických rozpouštědel, nebo za studena. V prvním případě je v oleji obsažen nadbytečný fosfor. V druhém, tedy při lisování za studena, nadbytečný fosfor už není.[3]

1.2.2 Rýžový olej

Rýžový olej je získáván z rýžových otrub (část mezi zrnem a slupkou), pomocí několika kroků výroby. Olej je rafinován a má zlatou barvu, která má specifickou vůni rýže. Olej odolává velmi vysokým teplotám (až 215 °C), proto se často používá při vaření. Obsahuje vysoký podíl vitamínu E, což oleji poskytuje dobrou oxidační stabilitu a také obsahuje z větší části mono-nenasycené kyseliny.[3]

1.2.3 Ricinový olej

Získaný ze semen skočce obecného. Je to bezbarvá a velmi světle žlutá kapalina. Má široké spektrum použití např. brzdové kapaliny, maziva, odolné laky za studena, léčiva atd. Jelikož má Ricinový olej nízký bod tuhnutí a malou kouřivost, lze jej použít i do biopaliv.[3]

1.2.4 Slunečnicový olej

Tlačí se ze semen slunečnice. Je běžně používán jako přídavek k potravinám a ke kosmetickým účelům. Olej má světle jantarovou barvu, rafinovaný je potom světle žlutý. Olej obsahuje vitamin E, steroly, alifatické uhlovodíky ad. Slunečnicový olej může být použit jako přísada k palivu pro vznětové motory.[3]

1.2.5 Sojový olej rafinovaný

Sojový olej se získává lisováním sójových bobů při teplotě od 60 °C do 90 °C. Výsledná olejová kapalina je světle žlutá. Tento olej je rafinovaný a používá se pro další aplikace. Oleje, které jsou částečně hydrogenované, se prodávají jako rostlinné oleje. Zbytky z výroby, známé jako sojová moučka, se používá jako krmivo pro zvířata. Bod tuhnutí je okolo -13 °C.[3]

1.2.6 Palmový olej

Olej získaný z palmy olejné. Získává se z oplodí palem, nikoli ze semen. V EU patří hned za řepkový olej jako druhý nejpoužívanější olej v potravinářství. Hlavní složkou je kyselina laurová a kyselina palmitová. Obsahuje velké množství vitamínu E a nenasycených mastných kyselin. Tento olej je při pokojové teplotě bílou až nažloutlou hmotou. Jeho hustota při 50 °C je 859 kg/m³. V průmyslu se využívá jeho vysoké stability proti oxidaci. Je důležitý pro výrobu biopaliva. Nedoporučuje se k výživě – ucpává cévy.[3]

1.2.7 Olivový olej

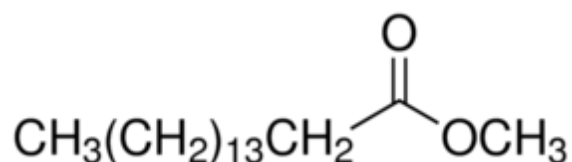
Olivový olej se získává lisováním plodů olivovníku evropského. Nejvíce je v olivovém oleji zastoupena kyselina olejová, její podíl se pohybuje v rozmezí 56-85 %. Množství složek obsažených v oleji ze závislé na prostředí, kde olivovník vyrůstá. Používá se především v potravinářském průmyslu anebo i v kosmetickém či farmaceutickém průmyslu. Olivový olej pro svůj velký obsah mono-nenasycených mastných kyselin je velmi prospěšný lidskému zdraví.[3]

1.3 Charakterizace vybraných složek rostlinných olejů

Rostlinné oleje jsou mimo jiné tvořeny mastnými kyselinami a přírodními estery. Z pohledu chemie a konkrétně biochemie, jsou mastné kyseliny karboxylové kyseliny s dlouhým alifatickým řetězcem, které jsou buď nasycené, nebo nenasycené.[4] Mastné kyseliny jsou většinou deriváty triglyceridů nebo fosfolipidů. Estery jsou potom deriváty organických nebo anorganických kyselin, ve kterých je alespoň jedna hydroxylová –OH skupina nahrazena alkylovou skupinou.[5] Z nich zde bude uveden výčet a popis těch, které byli podrobeny analýze podle zadání této práce. Výsledky analýzy jsou pak uvedeny v praktické části.

1.3.1 Methyl palmitát

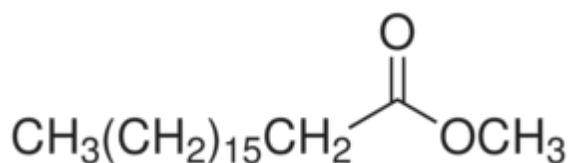
Methyl palmitát má vzorec $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOCH}_3$. Je to bezbarvá kapalina s teplotou varu $211,5\text{ }^\circ\text{C}$ a teplotou tání $36\text{ }^\circ\text{C}$. Je rozpustná v alkoholu a éteru. Používá se při výrobě detergentů, pryskyřice, změkčovadel, mazadel, a jako krmivo pro zvířata.[6] Za běžných teplotních podmínek je v tuhém skupenství a má bílou barvu



Obrázek 1 – Strukturální vzorec methyl palmitátu

1.3.2 Methyl stearát

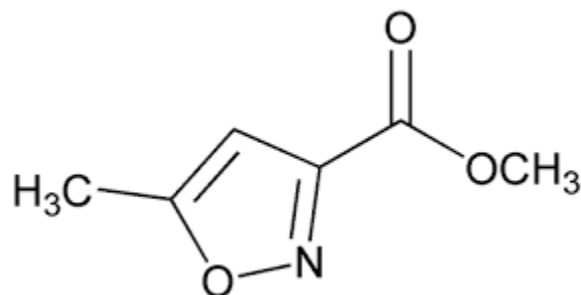
Methyl stearát má vzorec $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOCH}_3$. Při běžných tepelných podmínkách se vyskytuje ve formě bezbarvých krystalů o teplotě tání $39\text{ }^\circ\text{C}$. Je rozpustný v alkoholu, etheru a nerozpustný ve vodě. Používá se jako meziprodukt pro výrobu kyseliny stearové.[6]



Obrázek 2 – Strukturální vzorec methyl stearátu

1.3.3 Ethyl linoleát

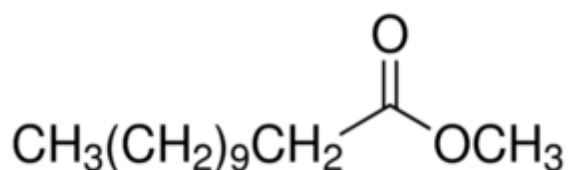
Methyl linoleát má vzorec $C_{19}H_{34}O_2$. Je to hořlavá, bezbarvá kapalina s teplotou varu $212\text{ }^\circ\text{C}$. Rozpustná v alkoholu a éteru. Používá při výrobě pracích prostředků, emulgátorů, mazadel, textilií, a v lékařském výzkumu.[6] Za běžných tepelných podmínek je v tekutém skupenství.



Obrázek 3 – Strukturní vzorec ethyl linoleátu

1.3.4 Methyl laurát

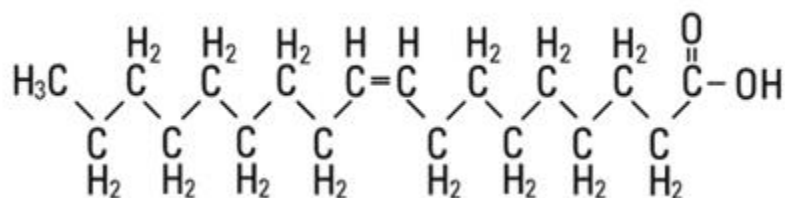
Methyl laurát má vzorec $CH_3(CH_2)_{10}COOCH_3$. Je to ve vodě nerozpustná, čirá, bezbarvá kapalina vroucí při $262\text{ }^\circ\text{C}$. Používá se jako chemický meziprodukt při výrobě odstraňovačů rzi.[6] Za běžných tepelných podmínek je v tekutém skupenství a má nepříjemný zápach.



Obrázek 4 – Strukturní vzorec methyl laurátu

1.3.5 Kyselina olejová

Kyselina olejová má vzorec $C_{17}H_{33}COOH$. Je to nažloutlá, nenasycená mastná kyselina s vůní připomínající sádlo. Je rozpustná v organických rozpouštědlech, lehce rozpustná ve vodě. Vře při $286\text{ }^\circ\text{C}$. Je hlavní složkou olivových a jedlých olejů. Používá se v mýdlech, mastech, v kosmetice a při obohacování rud. Také známá jako kyselina oktadecenová nebo červený olej.[6] Za běžných tepelných podmínek je v tekutém skupenství.



Obrázek 5 – Strukturní vzorec kyseliny olejové

1.4 Charakterizace minerálních olejů

V současnosti nejrozšířenějšími elektrotechnickými oleji jsou minerální oleje. Získávají se destilací z ropy a jejich vlastnosti se dále vylepšují rafinací. Při ní se z oleje odstraňují některé nežádoucí látky obsahující kyslík. Nečistoty se také odstraňují aktivní hlinkou a jejím odfiltrováním, ochlazením a následným vykrystalizováním parafinů nebo odplyněním. Z chemického hlediska jsou minerální oleje složitou směsí uhlovodíků, jejichž poměry určují vlastnosti daného oleje. Například vyšší přítomnost parafinických složek má za následek vyšší viskozitu oleje a nižší hodnotu ztrátového činitele, vyšší obsah benzenových složek má za následek nižší hodnotu viskozity.[7]

Minerální oleje se definují jako směs různých uhlovodíků z lehkých olejů a jsou vyráběny destilací z ropy a dělí se na transformátorové, kabelové a kondenzátorové. U těchto olejů je stability parametrů dosahováno za pomoci inhibitorů (antioxidantů).[8]

Transformátorové oleje se vyznačují vysokou odolností vůči stárnutí. Jejich hlavní funkcí je zprostředkování dobrého odvodu tepla. Je u nich požadována co nejnižší viskozita. Kondenzátorové oleje se od transformátorových liší zpravidla ostřejší rafinací. Jejich nevýhodou je poměrně nízká relativní permitivita a hořlavost. Kabelové oleje se vyznačují vysokou hodnotou viskozity, aby olej nestékal z povrchu izolace, což by mělo za následek průrazy v místech izolace, odkud olej odtéká.[10]

Dále se využívají v různých odvětvích např. jako rozpouštědla, maziva, ochrana povrchů, jako izolační kapaliny atd. Většinou se jedná o toxické oleje. Existují i minerální oleje, které jsou nízkotoxické, ty se používají na ochranu povrchu vajec nebo proti prašnosti obilí. Ale i tak se jedná o potraviny, které by neměly být povoleny ke konzumaci.[3]

Minerální oleje se dělí na parafinické, naftenické a aromatické.

1.4.1 Parafinické

Parafinické oleje jsou mastné, čiré, bezbarvé kapaliny. Při pokojové teplotě jsou bez zápachu a bez chuti. Po zahřátí mají mírně nepříjemný zápach ropy. Jsou nerozpustné ve vodě, glycerolu a studenem etanolu. Rozpouštědlem může být benzen, chloroform a horký etanol. Hustota je 0,8 g/cm³. Používá se v průmyslových oblastech (např. při výrobě barviv, pigmentů, barev, vosku, dále se používá jako mazivo, izolační kapalina v transformátorech), ale i pro lékařské účely (při přípravě léků, balzámů a mastí).[9]

1.4.2 Naftenické

Neobsahují vosk, proto mají nižší bod tuhnutí, nižší viskozitu menší odolnost proti oxidaci a jsou stabilnější. Používají se pro mnoho různých aplikací (např. chladicí oleje, v elektrotechnice má využití zejména pro kabelovou techniku).[9]

1.4.3 Aromatické

Jsou to vedlejší produkty vznikající při rafinaci parafinických olejů. Mají cyklickou strukturu, většinou jsou tmavší barvy a používají se pro výrobu lepidel a pečticích vosků.[9]

1.5 Významné vlastnosti minerálních a rostlinných olejů

Jak už bylo zmíněno, oleje se od sebe liší elektrickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Zde je výčet těch nejzásadnějších pro elektrotechnický průmysl.

1.5.1 Průrazné napětí

Elektroizolační kapaliny si uchovávají svoje vlastnosti a jsou schopny plnit požadovanou funkci pouze do určité hodnoty přiloženého napětí. Tento bod se nazývá průrazné napětí, udává se v kV. Na velikost průrazného napětí má vliv několik faktorů. Nejvýznamnější jsou vzdálenost elektrod, tvar elektrického pole, obsah emulgované nebo vázané vody v elektroizolační kapalině, obsah plynů a nečistot a teplota pevných nečistot.[11]

1.5.2 Vnitřní rezistivita

Jak už z názvu elektroizolačních kapalin vyplývá, jejich primární funkcí je od sebe vzájemně izolovat části přístroje pod napětím. Z tohoto důvodu je vysoká vnitřní rezistivita základním požadavkem pro schopnost vykonávat jejich funkci. Snížení vnitřní rezistivity v kapalných izolantech bývá způsobeno přítomností cizích částic nebo vody. Měření vnitřní rezistivity elektroizolační kapaliny v průběhu jejího stárnutí má velký význam, protože umožňuje určit, v jakém je kapalina v daném okamžiku stavu.[11]

1.5.3 Komplexní permitivita

Vlastnost, která se projevuje v dielektrických materiálech při použití střídavého elektrického pole. Je složená z relativní permitivity a ztrátového čísla. Relativní permitivita udává, kolikrát větší je schopnost materiálu držet náboj oproti vakuu. Ztrátové číslo pak udává míru dielektrických ztrát v materiálu.

1.5.4 Ztrátový činitel

Hodnota ztrátového činitele je důležitá v aplikacích využívajících střídavý proud. V těchto aplikacích totiž popisuje míru dielektrických ztrát. Jejich příčinou jsou polarizační mechanismy v elektroizolační kapalině, které způsobují zpoždění fázoru elektrické indukce a fázoru elektrického pole o úhel δ . Ztrátový činitel je definován jako tangens tohoto úhlu. Jeho hodnota závisí především na tom, zda se jedná o polární, nebo nepolární elektroizolační kapalinu a na množství a vlastnostech příměsí a nečistot.[11]

1.5.5 Přítomnost vody v oleji

Přítomnost vody v oleji je jednoznačně negativní jev. Snižuje elektrickou pevnost oleje, urychluje oxidaci, a může způsobit rozklad aditiv, podpořit růst mikroorganismů a způsobovat korozi kovových částí systému a zhoršení mazacích schopností. Voda se do oleje může dostat buď ze vzduchu, nebo jako produkt polykondenzačních reakcí probíhajících v oleji, ke kterým dochází v průběhu stárnutí.[11]

1.5.6 Bod vzplanutí

Bod vzplanutí je důležitý údaj elektroizolačních kapalin především z pohledu bezpečnosti. Aby došlo k hoření, musí elektroizolační kapalina vytvořit se vzduchem směs v určitém poměru v přítomnosti zdroje tepla, který je iniciátorem hoření. Podle bodu vzplanutí je klasifikována nebezpečnost látek. Bod vzplanutí je teplota, při které dojde po přiblížení plamene ke vznícení a následnému pohasnutí par kapaliny.[11]

1.5.7 Bod tuhnutí

Jeho znalost má význam, má-li být elektroizolační kapalina vystavena nízkým teplotám. S klesající teplotou roste viskozita kapaliny a tím klesá její schopnost odvádět teplo. Bod tuhnutí je teplota, při které elektroizolační kapalina přestává téct.[11]

1.5.8 Barva

Míru zestárnutí oleje lze určit také podle barvy - v průběhu stárnutí totiž oleje tmavnou. Barva oleje se nejčastěji mění následkem polymeračních a polykondenzačních reakcí, jejichž produktem jsou látky v oleji rozpustné. Barvu je možno hodnotit buď subjektivně porovnáním s barevným standardem, nebo přesněji porovnáním míry absorpce v kolorimetru.[11]

1.5.9 Viskozita

Viskozita elektroizolačních kapalin má význam především, pokud kapalina plní také funkci odvádění tepla (např. od vinutí transformátoru). S rostoucí viskozitou kapaliny totiž klesá množství tepla odvedeného cirkulací. Na viskozitu má vliv molekulová hmotnost látek obsažených v kapalině a také přítomnost některých příměsí. Viskozitu zvyšují pryskyřice nebo asfaltové látky, snižují ji naopak například alkany.[11]

1.6 Současný stav v diagnostice a použití rostlinných olejů

Pro účely sepsání této kapitoly, byly dány k dispozici vědecké články prezentované na ICDL 2014 (International Conference on Dielectric Liquids). Z nich byly vybrány ty, které se nejvíce blíží problematice současného využití a diagnostice v oblasti elektroizolačních kapalin a zároveň souvisejí s touto prací.

1.6.1 Vliv viskozity a obsahu vody na elektrickou pevnost rostlinných olejů

Článek [12] pojednává o vlivu viskozity a obsahu vody na elektrickou pevnost rostlinných olejů, při použití střídavého elektrického pole a to u slunečnicového a olivového oleje. Slunečnicový olej byl podroben tepelnému stárnutí při teplotě 135 °C, čímž u něj došlo ke změně barvy a zvýšení viskozity i obsahu vody, což mělo za následek jednak očekávané zvýšení vodivosti, ale navíc i neočekávané zvýšení elektrické pevnosti. K ověření vlivu obsahu vody na elektrickou pevnost bylo použito olivového oleje. Ten byl sušen ve vakuu a následně “obohacen“ destilovanou vodou. Po přidání vody došlo ke zvýšení vodivosti a snížení elektrické pevnosti, z čehož vyplývá, že vyšší viskozita má pozitivní vliv na elektrickou pevnost.

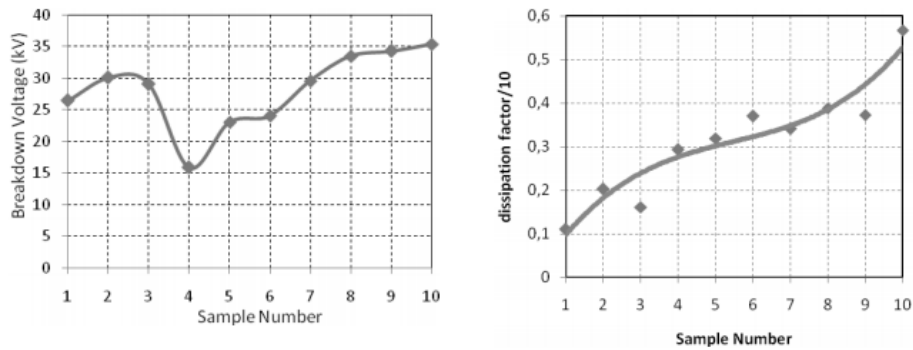
1.6.2 Elektrické a fyzikálně-chemické vlastnosti směsí minerálních a rostlinných olejů

Článek [13] pojednává o experimentu, kdy bylo vytvořeno deset směsí naftenického minerálního a rostlinného oleje, pokaždé s různým poměrem objemu. První vzorek byl čistý naftenický minerální olej a při každém dalším vzorku bylo sníženo jeho procentuální množství a rozdíl dorovnán rostlinným olejem. Složení směsí je zřejmé z obrázku 6.

Sample N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ratio of Borak (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	50
Vegetable Oil Ratio (%)	00	05	10	15	20	25	30	35	40	50

Obrázek 6 - Tabulka procentuálního obsahu minerálního a rostlinného oleje v jednotlivých vzorcích[13]

Směsi pak byly podrobeny měření hustoty, průrazného napětí, ztrátového činitele a vodivosti. Bylo zjištěno, že s rostoucím obsahem rostlinného oleje se zvyšuje i hustota. Výsledky měření průrazného napětí a ztrátového činitele jsou zřejmé z obrázku 7. Z pohledu vodivosti se ukázal jako nejlepší vzorek, který obsahoval z 85% naftenické minerální olej a z 15% rostlinný olej.



Obrázek 7 - Závislost hustoty a ztrátového činitele na poměru minerálního a rostlinného oleje v jednotlivých vzorcích[13]

1.6.3 Vliv materiálu elektrody na měření vodivosti působením DC pole

Článek [14] pojednává o experimentu, kdy bylo testováno, jak materiál elektrod ovlivňuje výsledky měření vodivosti materiálu. V tomto experimentu byly použity elektrody z nerezové oceli, hliníku a mědi. Vodivost pak byla měřena při působení různé intenzity pole (100 V/mm, 1000 V/mm, 4000V/mm) a po různou dobu (1 s, 60 s, 120 s, 3600 s). Experiment ukázal, že výsledky měření vodivosti pomocí měděné elektrody při dlouhém měření jsou až dvakrát vyšší, než výsledky získané pomocí hliníkové elektrody nebo elektrody z nerezové oceli.

2 Metody měření některých vlastností

Ke zjištění různých vlastností je využíváno rozličných metod měření. Zde jsou uvedeny příklady měření hustoty, viskozity a permitivity.

2.1 Metody měření hustoty

Hustota představuje hodnotu dané veličiny vztažené k jednotkovému objemu (bývá také označována jako objemová hustota), jednotkovému obsahu plochy (pak se hovoří o plošné hustotě) nebo jednotkové délce (pak se hovoří o lineární hustotě).

Hustota ρ tělesa je dána vztahem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Kde m je hmotnost tělesa a V jeho objem. Hustotu lze měřit několika způsoby

2.1.1 Metoda měření hustoty kapalin pomocí pyknometru

Pyknometr je skleněná nádobka se zabroušenou zátkou s kapilárním otvorem. Při zazátkování se otvorem vytlačí přebytečná kapalina a v pyknometru zůstane přesně stanovený objem, označený na nádobce. Protože se tento objem vztahuje pouze na teplotu uvedenou na baňce a je nutno používat původní zátky, pro kterou je baňka kalibrovaná (což ve školních praktikách lze těžko zabezpečit), nespolehneme se při měření na tento údaj a objem pyknometru určíme pomocí destilované vody. Měření kapaliny tímto způsobem spočívá v trojím vážení.[15]

1. Zvážíme prázdný pyknometr se zátkou a zjistíme jeho hmotnost m_1
2. Naplníme pyknometr kapalinou známé hustoty ρ_1 (destilovanou vodou) a určíme jeho hmotnost m_2
3. Zvážíme pyknometr naplněný kapalinou neznámé hustoty ρ a zjistíme hmotnost m_3

Objem pyknometru je:

$$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_1} \quad (2)$$

Hustota neznámé kapaliny je:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{V} \quad (3)$$

Dosadíme-li za objem V z (2), obdržíme:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \rho_1 \quad (4)$$

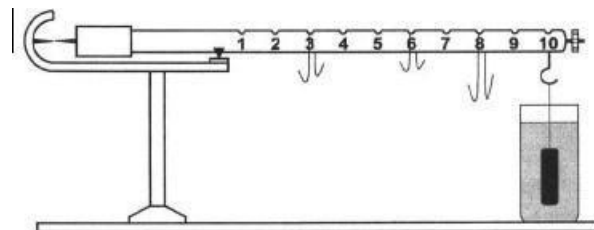


Obrázek 8 – Pycnometr

2.1.2 Metoda měření hustoty kapalin Mohrovými vážkami

Mohrovy vážky jsou nerovnoramenné pákové váhy. Jejich delší rameno je rozděleno na 10 stejných dílků. Pod 10. dílkem visí skleněné tělísko ve tvaru teploměru. Kratší rameno nese posuvné závaží, kterým lze přesně vyvážit tíhu tělíska ve vzduchu. K vážkám přísluší 3 závaží ve tvaru jezdců, jejichž hmotnost jsou 1:1, 1:0,1, 1:0,01. Největší jezdcí jsou dva a jejich hmotnost je volena tak, že je-li jezdec zavěšen na 10. dílku (tj. na háčku na který se větší skleněné tělísko), vyrovnává vztlak, kterým je úplně ponořené tělísko vytlačováno z destilované vody 20 °C teplé. Kalibraci vážek provádíme pomocí destilované vody. Správnou hustotu ρ_0 , odpovídající teplotě vody najdeme v tabulkách. Naměříme-li na vážkách hustotu ρ_1 , je třeba všechny naměřené hodnoty v dalším měření násobit konstantou K danou poměrem[15]:

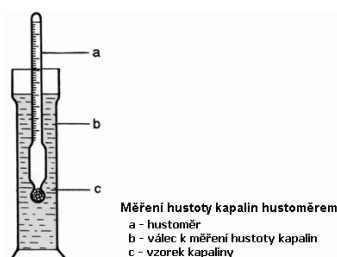
$$K = \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (5)$$



Obrázek 9 - Mohrovy vážky[16]

2.1.3 Metoda měření hustoty kapalin hustoměrem

Hustoměry (areometry) jsou ponorná tělesa s nerovnoměrnou stupnicí udávající podle hloubky ponoření přímo hustotu kapaliny.[15]



Obrázek 10 – Hustoměr[17]

2.1.4 Metoda měření hustoty kapalin Archimédovou metodou

K měření se využívají přesné automatické váhy, které využívají principu Archimédova zákona. K určení hustoty je potřeba ponorné tělesko s definovaným objemem. K tomuto účelu je ideální použít etalon objemu. Tělesko se zváží ve vzduchu a poté zcela ponořené v měřené kapalině. Váhy v sobě mají program, který následně z naměřených hodnot vypočítá hustotu měřené kapaliny.

K tomu využívá následujícího vztahu:

$$\rho = \alpha \frac{m_a - m_l}{V} + \rho_a \quad (6)$$

Kde m_a je hmotnost tělíska ve vzduchu, m_l je hmotnost tělíska v měřené kapalině, V je objem tělíska, ρ_a hustota vzduchu ($0,0012 \text{ g/cm}^3$), ρ je výsledná hustota měřené kapaliny a α je korekční faktor ($0,99985$).



Obrázek 11 - váhy užívané k měření hustoty archimédovou metodou[18]

2.2 Metody měření viskozity

Viskozita (také vazkost) je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině.

Dělí se na dynamickou a kinematickou.

Dynamická viskozita vyjadřuje sílu nutnou k pohybu jednotkové plochy uvnitř kapaliny, která se pohybuje danou rychlostí proti druhé rovnoběžné vrstvě vzdálené 1 m. Značí se řeckým písmenem η [éta]. Jednotkou dynamické viskozity je $(N \cdot m^{-2} \cdot s)$ neboli $(Pa \cdot s)$. Viskozita laminárního proudění kapaliny, kde je gradient rychlosti $1 s^{-1}$ vzniká tečné napětí 1 Pa. Další jednotkou může být Poise, ta odpovídá viskozitě 0,1 Pa · s.[3]

Kinematická viskozita je označována řeckým ν [ný] a je to míra odporového toku kapaliny pod vlivem gravitace. Je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny. Jednotkou kinematické viskozity je $(m^2 \cdot s^{-1})$. [3]

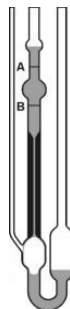
2.2.1 Metoda měření viskozity kapilárním viskozimetrem[20]

Měření viskozity je založeno na Poiseuillově rovnici pro průtok kapaliny kapilárou o poloměru r a délce l :

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p \cdot \tau}{8V \cdot l} \quad (7)$$

kde Δp je rozdíl tlaků, daný hydrostatickým tlakem kapaliny ve svislé kapiláře, který je úměrný hustotě kapaliny, V objemu kapaliny, který proteče kapilárou za čas τ . Viskozita je tedy úměrná hustotě kapaliny a době průtoku. Obvykle se provádí měření relativní, při němž se na stejném viskozimetru porovnává viskozita měřené kapaliny η se známou viskozitou srovnávací kapaliny.

Kapilární viskozimetry jsou přesné (0,01 až 0,1 %), avšak nemohou být použity pro newtonské kapaliny, neboť rychlostní gradient není konstantní – roste se vzdáleností od osy kapiláry.



Obrázek 12 - Ubbelohdeův kapilární viskozimetr[20]

2.2.2 Metoda měření viskozity padajícím tělískem[3]

Pracuje na principu pádu definovaného tělíska, nejlépe kuličky. Nejjednodušším viskozimetrem je Stokesův viskozimetr. Podle Stokesa platí zákon pro rychlost pádu tělíska:

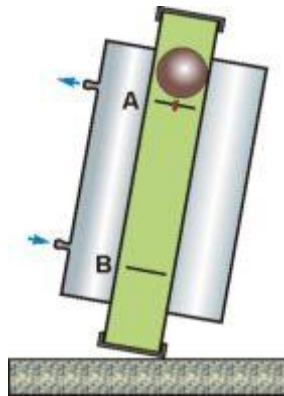
$$v = \frac{F}{6\pi\eta*r} \quad (8)$$

$$F = \frac{3}{4\pi} * r^3 * (\rho - \rho_0) * g \quad (9)$$

Kde ρ a ρ_0 jsou hustoty kapaliny a tělíska a r je poloměr tělíska. Pro stanovení viskozity pak platí vztah:

$$\eta = 2g * r^2 * \frac{\rho - \rho_0}{9v} \quad (10)$$

Častou variantou kuličkových viskozimetrů je viskozimetr Höpplerův (obr. 5). Kulička se valí skleněnou trubicí o přesném vnitřním průměru, skloněnou v úhlu 10° , naplněnou měřenou kapalinou, obklopenou pláštěm, který zajišťuje tepelnou izolaci. Měří se čas, potřebný k průchodu kuličky mezi horní ryskou A a spodní ryskou B. Obvykle se měří srovnávacím způsobem a je nevhodný pro měření neprůhledných a neneutonských kapalin.[20]

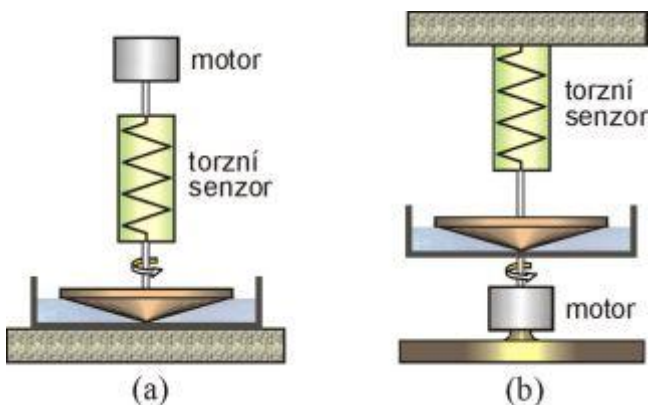


Obrázek 13 - Höpplerův viskozimetr[20]

2.2.3 Metoda měření viskozity rotačním viskozimetrem

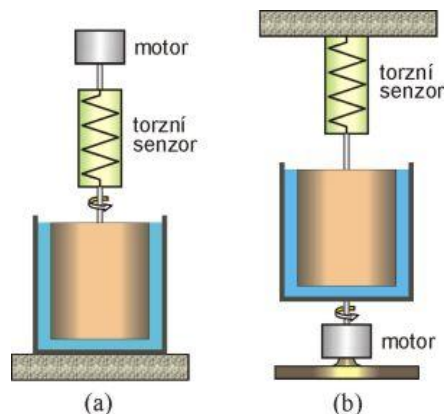
Rotační viskozimetry jsou založeny na měření torzní síly, kterou působí rotující kapalina na element zavěšený na torzním vlákně. Rotační viskozimetr sestává buď ze dvou soustředných válců, mezi nimiž je úzká mezera, vyplněná měřenou kapalinou (obr. 7) nebo z kužele a desky (obr. 6). Jeden z elementů se otáčí konstantní úhlovou rychlostí, vnitřním třením kapaliny je otáčivý moment přenášen na druhý element, zavěšený na torzním vlákně. Po ustavení rovnováhy se měří úhel pootočení elementu od původní polohy φ , který je úměrný úhlové rychlosti ω a viskozitě kapaliny (K je konstanta přístroje). Tyto viskozimetry jsou vhodné i ke studiu neneutonských kapalin.[20]

$$\varphi = K * \eta * \omega \quad (11)$$



Obrázek 14 - Schéma rotačního viskozimetru kužel-deska[20]

- a) Systém Couett s otáčivým kuželem
- b) Systém Searle s otáčivou deskou



Obrázek 15 - Schéma rotačního viskozimetru se dvěma soustřednými válci[20]

- a) systém Couett s otáčivým vnitřním válcem
- b) systém Searle s otáčivým vnějším válcem

2.2.4 Metoda měření viskozity vibračním viskozimetrem

Princip vibračního viskozimetru spočívá ve vibraci čidel (destiček) v kapalině, kde v závislosti na viskozitě kapaliny dochází k útlumu vibrací. Snímací destičky jsou spojeny s pružinovou destičkou, která vibruje jednotnou frekvencí. Tyto kmity jsou buzeny elektromagnetem, který je součástí elektromagnetického pohonu. Amplituda se mění v závislosti třecí síly, která vzniká mezi snímací destičkou a vzorkem kapaliny. Přístroj potom nastavuje velikost proudu, který ovládá frekvenci a amplitudu kmitů, dokud destičky nekmitají referenční frekvencí a amplitudou. Z velikosti nastaveného proudu je pak odvozena viskozita měřené látky.[3]

Uvedený princip měření je pro viskozimetr od firmy A&D. Dalšími používanými principy jsou určení viskozity z doby útlumu po vypnutí přístroje a z rezonanční frekvence.



Obrázek 16 - vibrační viskozimetr od firmy A&D[19]

2.3 Metody měření permitivity

Permitivita je fyzikální veličina, která udává, jak elektrické pole ovlivní schopnost dielektrického média se polarizovat v závislosti na použitém elektrickém poli. Relativní permitivita ϵ_r je číslo, které nám udává, kolikrát se zvětšila kapacita deskového kondenzátoru, ve kterém bylo místo vakua použito dielektrikum.[21]

Ve vakuu je relativní permitivita rovna jedné, protože zde nemůže docházet k polarizaci. U ostatních materiálů je tedy hodnota relativní permitivity vyšší než jedna. Velikost relativní permitivity je závislá na mnoha parametrech, jako je frekvence, teplota, intenzita elektrického pole, vlhkost a další.[9]

V případě střídavých polí je zaveden pojem komplexní permitivita, která je frekvenčně závislá. Tato veličina vyjadřuje činitel závislosti mezi intenzitou elektrického pole \vec{E} a elektrickou indukcí \vec{D} . [9] Je dána vztahem:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (12)$$

Kde ϵ' je relativní permitivita a ϵ'' je ztrátové číslo.

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (13)$$

Kde C je kapacita kondenzátoru s dielektrikem a C_0 je kapacita vakuového kondenzátoru se stejnými rozměry.

$$\epsilon'' = \tan \delta * \epsilon' \quad (14)$$

Permitivitu nelze měřit přímo. Vždy se vychází z měření kapacity kondenzátoru, který je materiálem vytvořen případně z měření jiných veličin a výsledná permitivita je následně dopočítána.

2.3.1 Metoda měření permitivity pomocí dutinových rezonátorů

Při používání těchto metod se vkládá měřený vzorek do dutinového rezonátoru. Vlivem změn parametrů v prostředí dutinového rezonátoru dojde ke změnám rezonančního kmitočtu a činitele jakosti. Ze změny rezonančního kmitočtu pak můžeme určit ϵ_r . Jedna z metod využívající dutinové rezonátory je metoda při které je dutina rezonátoru zcela vyplněna měřeným materiálem. Tento způsob se výhradně používá pro nemagnetické dielektrické materiály a to zejména pro plyny a kapaliny. Jen v těchto případech, kdy je rezonátor zcela vyplněn kapalinou nebo plynem, lze v jistých mezích přeladovat. Jednou z nevýhod této metody je nutnost zaplnit celý objem dutiny měřeným materiálem.[22]

2.3.2 Metoda měření permitivity ve volném prostoru

Tato metoda spočívá v tom, že volně umístěný materiál je ozařován signálem pomocí vhodného mikrovlnného zářiče, jako například trychtýřová anténa. Metoda měření ve volném prostoru poskytuje výhody hlavně na mm vlnách, kde se též hojně využívá. Na cm a dm vlnách se spíše používají metody využívající úseku vedení nebo vlnovodu a metody rezonátorové. V pásmech cm a dm vln, v případě že bychom chtěli použít metodu měření ve volném prostoru, museli bychom mít velké vzorky materiálů. Velké, přesně opracované desky však nejsou vždy k dispozici, proto se v těchto pásmech metoda měření ve volném prostoru nepoužívá. Tato metoda je pro měření permitivity kapalin nevhodná z důvodu nemožnosti umístění kapaliny do volného prostoru.[22]

2.3.3 Měření pomocí můstkové metody

K realizaci měření pomocí této metody je zapotřebí jednak měřicí přístroj a druhak elektrodotový systém určený k měření kapalin. Měřicí přístroj využívá principu takzvaného RLC můstku. Elektrodotový systém sestává z napět'ové a proudové elektrodoty. Měřicí přístroj pak na základě přiloženého napětí a procházejícího proudu vyhodnotí kapacitu a z fázového posunu proudu a napětí ztrátový činitel, což je tangens úhlu, který svírají fázory proudu a napětí.

3 Praktická část – měření

U vybraných vzorků olejů a jejich složek proběhla série měření hustoty, viskozity a komplexní permitivity. K tomuto účelu byla použita metoda měření hustoty pomocí archimédova zákona, metoda měření viskozity vibračním viskozimetrem a metody měření permitivity můstkovou metodou. Vzorky určené k analýze byly: Rýžový olej, Superolein (palmový olej), kyselina olejová, methyl laurát, methyl palmitát, methyl stearát, methyl linoleát, trafo CZ-A, trafo NA, HM46 SYNT, Silikon oil M350.

3.1 Měření hustoty

Měření hustoty proběhlo pomocí metody využívající principu archimédova zákona popsané v teoretické části. K tomuto účelu byly použity váhy EX224M od firmy Ohaus.

3.1.1 Průběh měření

Na váhách byl nejdříve zvážen etalon objemu (10 cm^3) ve vzduchu. Bylo zjištěno, že ve vzduchu etalon váží **27,2587 g**. Poté byl každý vzorek předeřán v klimatické komoře a vložen na stojan vah. Do měřeného vzorku byl umístěn etalon a zvážen v konkrétních teplotách. ($80 \text{ }^\circ\text{C}$, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $28 \text{ }^\circ\text{C}$). Vzorek byl navíc umístěn do vyhřáté vodní lázně, aby se zpomalilo jeho chladnutí. Hodnoty hmotností v různých teplotách byly zaznamenány a dosazením do vztahu (6) byly vypočítány hustoty vzorku v daných teplotách. Z vypočtených hodnot byl následně v programu MS Excel vytvořen bodový graf, který byl proložen spojnicí trendů, ze které byla vygenerována regresní rovnice.

$$\rho = \frac{\rho_0}{1+\beta\Delta t} \quad (15)$$

Kde ρ je hustota materiálu při dané teplotě, t_0 je pevně zvolená teplota (v našem případě $40 \text{ }^\circ\text{C}$) a ρ_0 hustota materiálu při pevně zvolené teplotě. Z regresní rovnice byly vypočítány přesné hodnoty hustoty pro dvě různé teploty a z rovnice (15) po úpravě vyjádřena hodnota konstanty β . Jako druhá hodnota hustoty byla zvolena hustota při teplotě $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnoty byly dosazeny do vztahu (16).

$$\beta = \frac{\rho - \rho_0}{-\rho_0 \Delta t} \quad (16)$$

Tabulka 1 - Tabulka změřených hmotností etalonu v měřených rostlinných olejích při různých teplotách (v gramech)

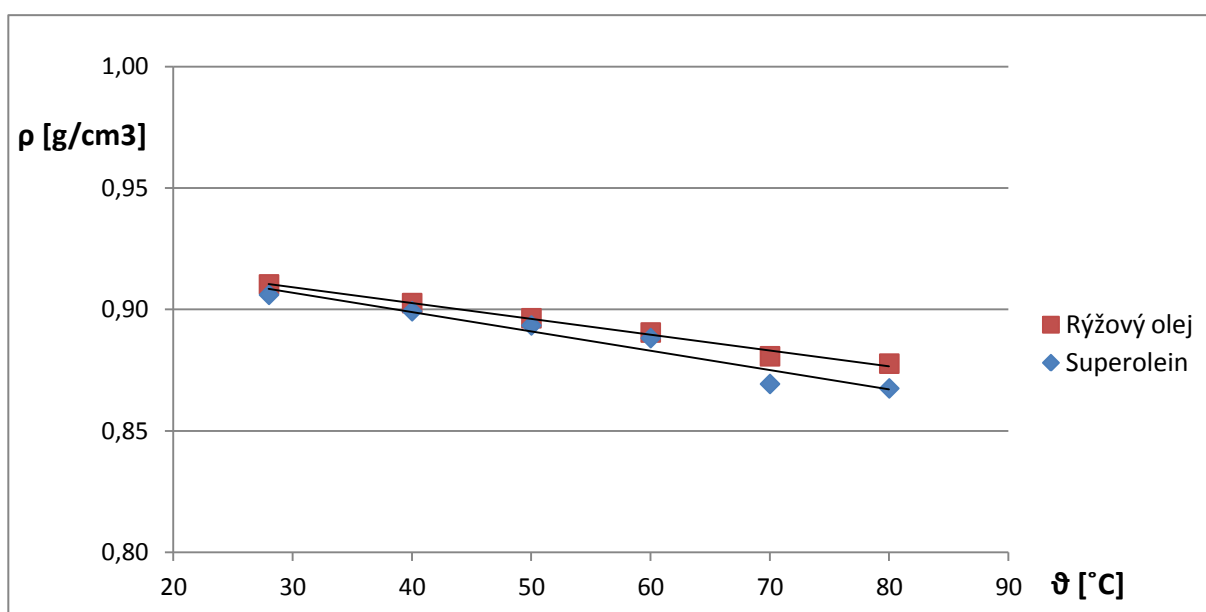
Teploty [°C]	Rýžový olej	Superolein
80	18,4925	18,5944
70	18,4622	18,5762
60	18,3643	18,3873
50	18,3056	18,3352
40	18,2432	18,2769
28	18,1663	18,2093

Tabulka 2 - Tabulka vypočítaných hustot měřených rostlinných olejů při různých teplotách (v g/cm³)

Teploty [°C]	Rýžový olej	Superolein
80	0,8777	0,8675
70	0,8807	0,8693
60	0,8905	0,8882
50	0,8964	0,8934
40	0,9026	0,8992
28	0,9103	0,9060

Tabulka 3 - Tabulka regresní rovnice a teplotního součinitele objemové roztažnosti pro měřené rostlinné oleje

	Rýžový olej	Superolein
Regresní rovnice	$y = -0,0007x + 0,9287$	$y = -0,0008x + 0,9312$
Koeficient objemové roztažnosti	7,96E-04	9,14E-04



Obrázek 17 - Graf teplotní závislosti hustoty měřených rostlinných olejů

Tabulka 4 - Tabulka změřených hmotností etalonu v měřených složkách rostlinných olejů při různých teplotách (v gramech)

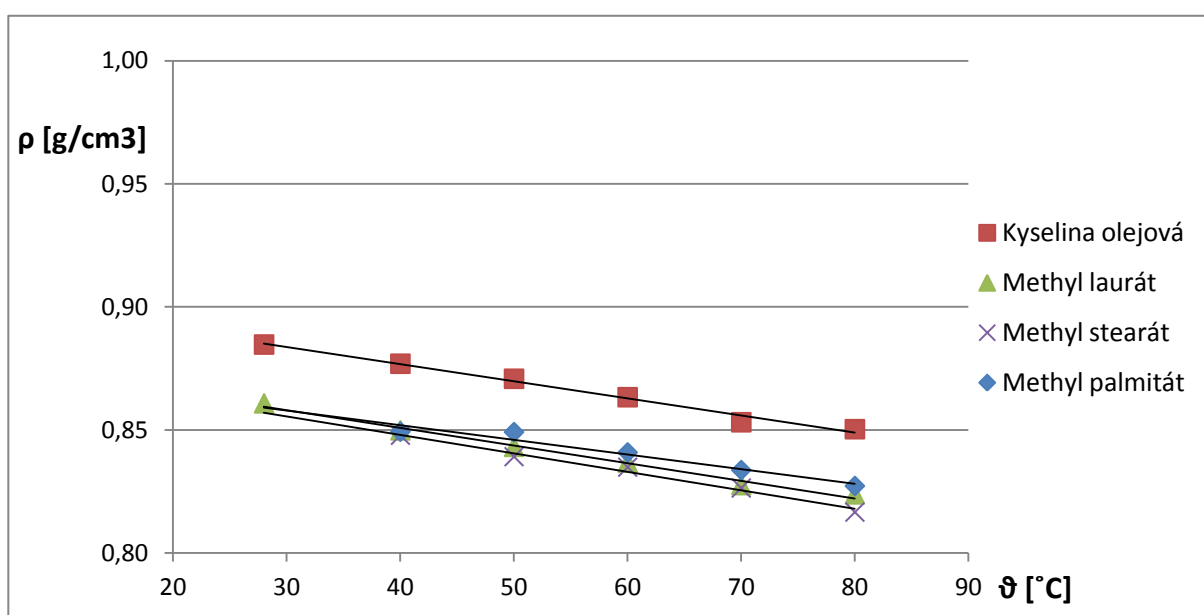
Teploty [°C]	Kyselina olejová	Methyl laurát	Methyl stearát	Methyl palmitát
80	18,7664	19,0311	19,1036	18,9971
70	18,7382	18,9936	19,0057	18,9325
60	18,6364	18,9019	18,9208	18,8607
50	18,5615	18,8381	18,8781	18,7782
40	18,5004	18,7712	18,7912	18,7767
28	18,4224	18,6614	-	-

Tabulka 5 - Tabulka vypočítaných hustot měřených složek rostlinných olejů při různých teplotách (v g/cm³)

Teploty [°C]	Kyselina olejová	Methyl laurát	Methyl stearát	Methyl palmitát
80	0,8503	0,8238	0,8166	0,8272
70	0,8531	0,8276	0,8264	0,8337
60	0,8633	0,8368	0,8349	0,8409
50	0,8708	0,8431	0,8391	0,8491
40	0,8769	0,8498	0,8478	0,8493
28	0,8847	0,8608	-	-

Tabulka 6 - Tabulka regresní rovnice a teplotního součinitele objemové roztažnosti pro měřené složky rostlinných olejů

	Kyselina olejová	Methyl laurát	Methyl stearát	Methyl palmitát
Regresní rovnice	$y = -0,0007x + 0,9046$	$y = -0,0007x + 0,8796$	$y = -0,0008x + 0,8781$	$y = -0,0006x + 0,8757$
Koeficient objemové roztažnosti	8,78E-04	8,50E-04	9,83E-04	7,25E-04



Obrázek 18 - Graf teplotní závislosti hustoty měřených složek rostlinných olejů

Tabulka 7 - Tabulka změřených hmotností etalonu v měřených minerálních olejích při různých teplotách

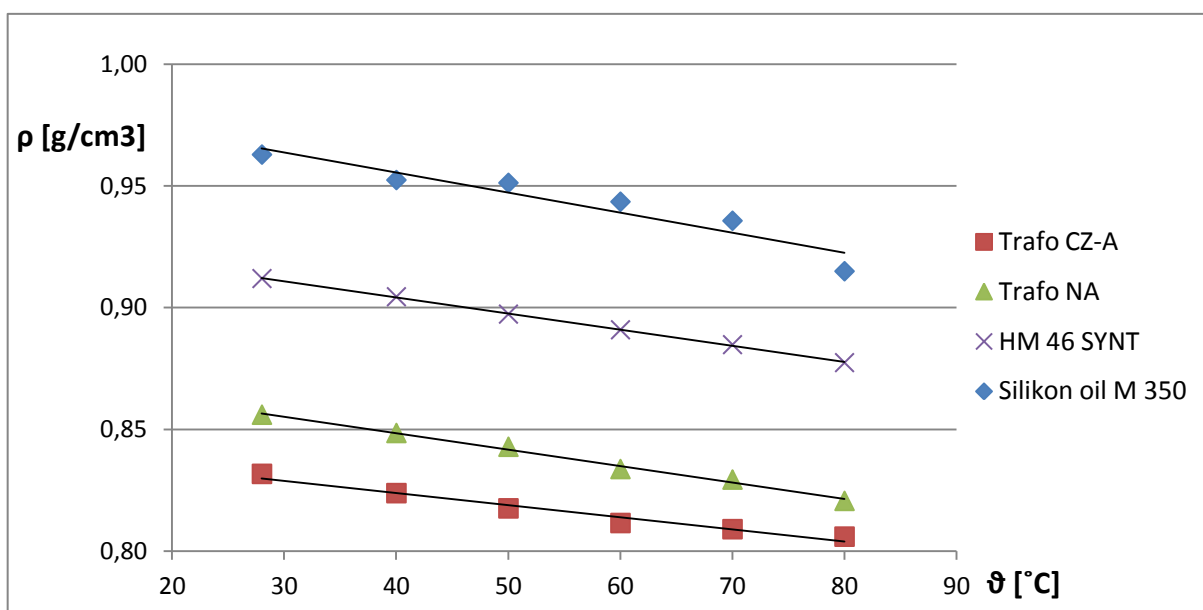
Teploty [°C]	Trafo CZ-A	Trafo NA	HM46 SYNT	Silikon oil M350
80	19,2102	19,0633	18,4956	18,1203
70	19,1796	18,9758	18,4218	17,9131
60	19,1542	18,9325	18,3607	17,8348
50	19,0941	18,8410	18,2964	17,7574
40	19,0316	18,7845	18,2249	17,7458
28	18,9525	18,7094	18,1503	17,6413

Tabulka 8 - Tabulka vypočítaných hustot měřených minerálních olejů při různých teplotách (v g/cm³)

Teploty [°C]	Trafo CZ-A	Trafo NA	HM46 SYNT	Silikon oil M350
80	0,8059	0,8206	0,8774	0,9149
70	0,8090	0,8294	0,8848	0,9356
60	0,8115	0,8337	0,8909	0,9434
50	0,8175	0,8428	0,8973	0,9512
40	0,8238	0,8485	0,9044	0,9523
28	0,8317	0,8560	0,9119	0,9628

Tabulka 9 - Tabulka regresní rovnice a teplotního součinitele objemové roztažnosti pro měřené minerální oleje

	Trafo CZ-A	Trafo NA	HM46 SYNT	Silikon oil M350
Regresní rovnice	$y = -0,0005x + 0,8439$	$y = -0,0007x + 0,8754$	$y = -0,0007x + 0,9306$	$y = -0,0008x + 0,9884$
Koeficient objemové roztažnosti	6,22E-04	8,54E-04	8,00E-04	8,65E-04



Obrázek 19 - Graf teplotní závislosti hustoty měřených minerálních olejů

3.2 Měření viskozity

Měření viskozity proběhlo na vibračním viskozimetru SV-10 od firmy A&D. Tato metoda měření viskozity je popsána v teoretické části. U každého vzorku oleje byla změřena teplotní závislost viskozity. K tomu bylo využito propojení viskozimetru s počítačem a programem Agilent VEE.

3.2.1 Průběh měření

Před započítím měření bylo nutné provést kalibraci viskozimetru. K tomu bylo užito dvoubodové metody kalibrace popsané v dokumentaci přístroje. Ta spočívá v tom, že se na základě viskozity měřeného vzorku vyberou dvě kapaliny se známou hodnotou viskozity a to tak, aby jedna měla viskozitu vyšší a druhá nižší než je viskozita měřeného vzorku. Obě referenční kapaliny jsou pak zahřáty na teplotu, při které výrobce garantuje jejich viskozitu. Po spuštění měření přístroj zobrazí naměřenou hodnotu viskozity, kterou může uživatel opravit tak, aby odpovídala hodnotám udávaným výrobcem. To je nutné zopakovat pro obě referenční kapaliny. Poté co byl přístroj zkalibrován, bylo možné přistoupit k samotnému měření. Do nádoby byl nalit vzorek měřeného oleje a ta vložena pod čidla viskozimetru. Nádoba pak byla vyzdvižena do takové výšky, aby byla hladina měřené kapaliny ve středu úzké části čidel viskozimetru. Po spuštění měření přístroj ukáže změřenou hodnotu na displeji. Díky propojení s počítačem bylo zaznamenáváno, jak se měnila viskozita vzorku po dobu chladnutí. Přístroj však měří pouze zdánlivou viskozitu η_{zdn} , což je součin dynamické viskozity η a hustoty ρ . Dynamickou viskozitu je pak nutné zpětně vypočítat pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{\eta_{zdn}}{\rho} \quad (17)$$

K získání hodnot hustoty v požadovaných teplotách, byly použity regresní rovnice z předchozího měření.

Vztah (18) udává závislost dynamické viskozity na teplotě.

$$\eta = \exp \left(A + \frac{B}{T} \right) \quad (18)$$

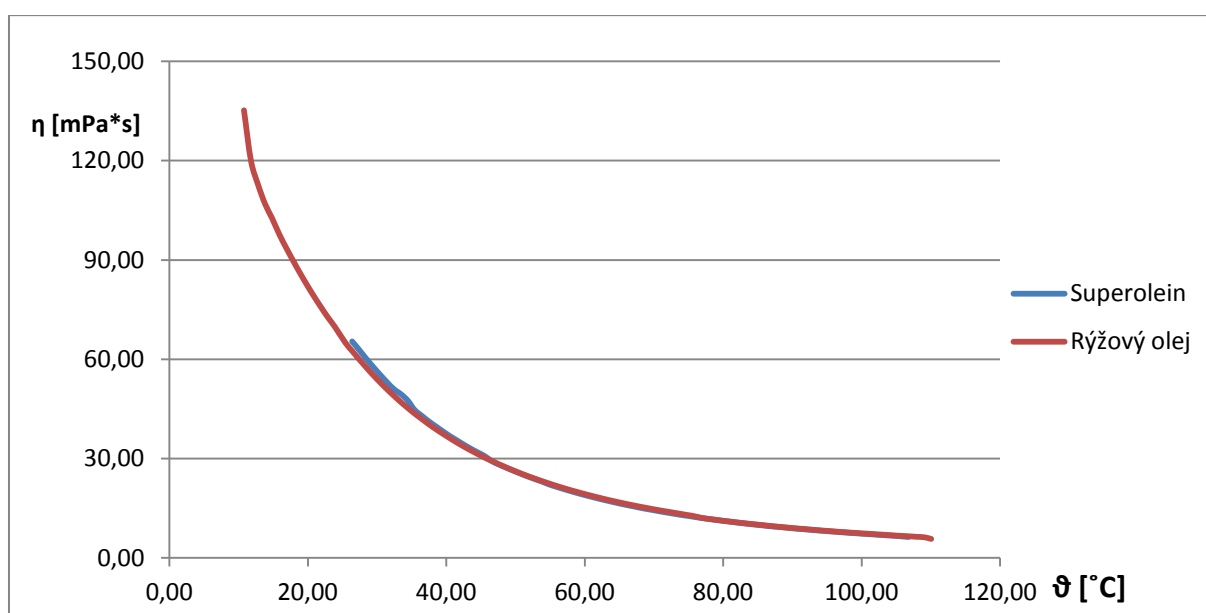
Kde η je dynamická viskozita, A a B jsou empirické konstanty a T je teplota v Kelvinech. Cílem tohoto měření bylo určit konstanty A a B pro všechny měřené vzorky. Toho bylo docíleno úpravou vztahu (18) a vyřešením soustavy rovnic o dvou neznámých s využitím známých hodnot viskozity při známé teplotě.

Tabulka 10 - Vybrané hodnoty dynamické viskozity měřených rostlinných olejů

Teploty (°C)	Rýžový olej	Superolein
80	11,18	11,12
70	14,86	14,52
60	19,24	18,95
50	26,37	26,36
40	36,10	36,94
28	57,49	60,29

Tabulka 11 - Tabulka vypočtených koeficientů A a B pro měřené rostlinné oleje

	Rýžový olej	Superolein
A	-6,8	-6,93
B	3287,67	3327,87



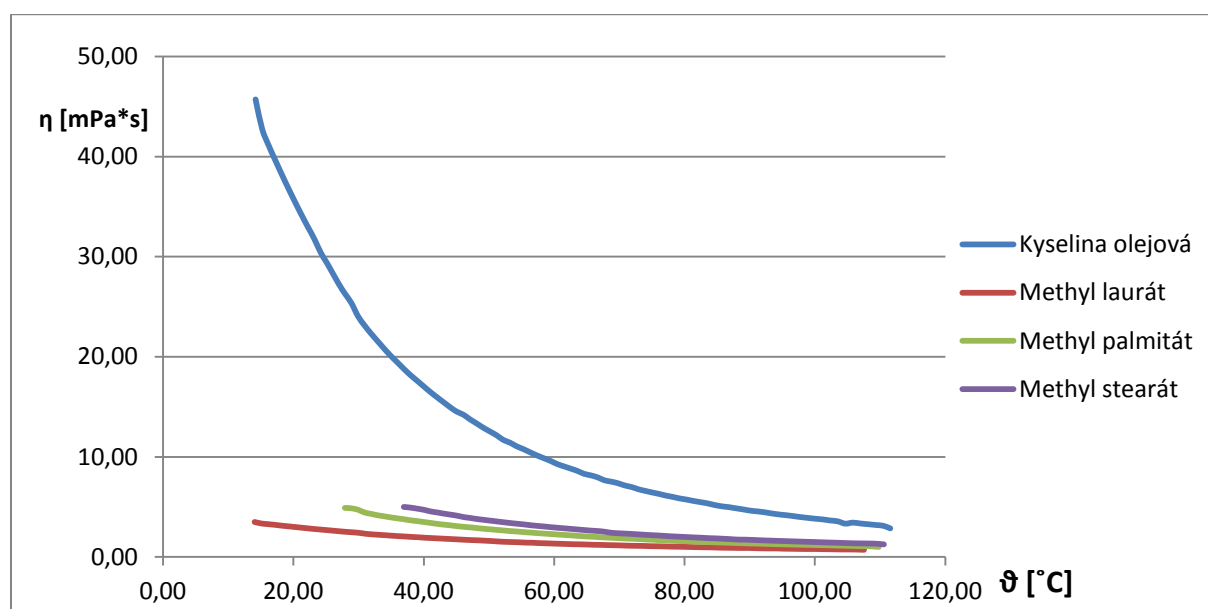
Obrázek 20 - Graf teplotní závislosti měřených rostlinných olejů

Tabulka 12 - Vybrané hodnoty dynamické viskozity měřených složek rostlinných olejů

Teploty [°C]	Kyselina olejová	Methyl laurát	Methyl stearát	Methyl palmitát
80	5,75	1,02	1,99	1,59
70	7,38	1,16	2,37	1,88
60	9,28	1,35	2,93	2,30
50	12,53	1,60	3,64	2,77
40	17,06	1,93	4,72	3,50
28	26,31	2,51	-	-

Tabulka 13 - Tabulka vypočtených koeficientů A a B pro měřené složky rostlinných olejů

	Kyselina olejová	Methyl laurát	Methyl stearát	Methyl palmitát
A	-6,85	-5,15	-5,64	-5,38
B	3054,79	1833,33	2254,90	2078,43



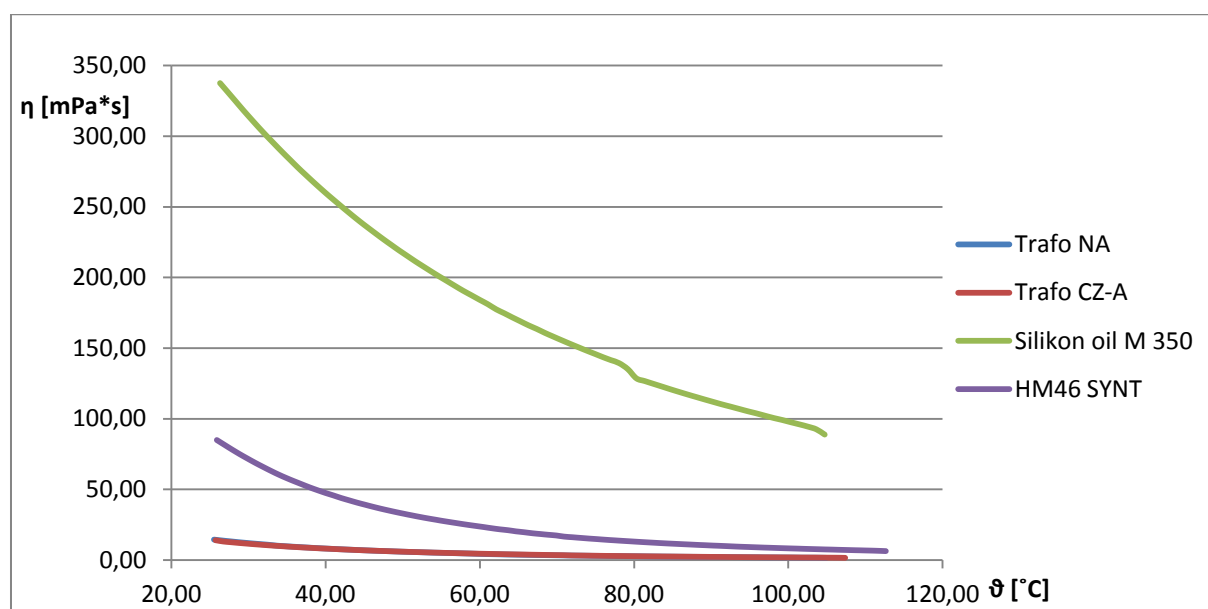
Obrázek 21 - Graf teplotní závislosti měřených složek rostlinných olejů

Tabulka 14 - Vybrané hodnoty dynamické viskozity měřených minerálních olejů

Teploty [°C]	Trafo CZ-A	Trafo NA	HM46 SYNT	Silikon oil M350
80	2,81	2,72	12,97	128,64
70	3,56	3,42	17,42	155,59
60	4,50	4,34	23,36	184,23
50	5,98	6,00	32,74	215,30
40	8,22	8,31	47,50	257,92
28	12,70	13,35	78,04	324,87

Tabulka 15 - Tabulka vypočtených koeficientů A a B pro měřené minerální oleje

	Trafo CZ-A	Trafo NA	HM46 SYNT	Silikon oil M350
A	-7,41	-7,56	-7,23	-0,1
B	3000,00	3049,18	3483,87	1769,23



Obrázek 22 - Graf teplotní závislosti viskozity měřených minerálních olejů

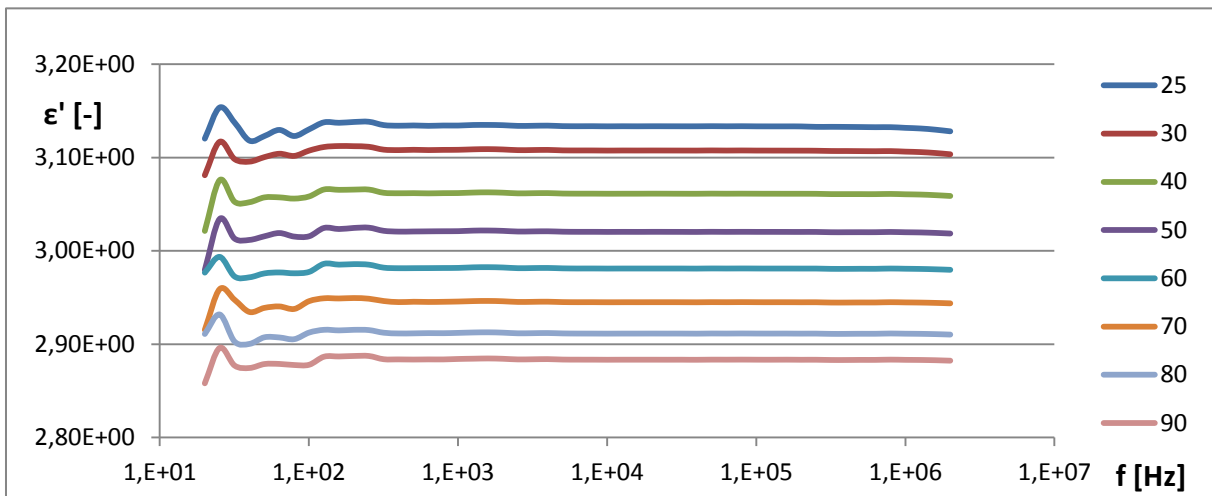
3.3 Měření permitivity a ztrátového činitele

Pro měření permitivity bylo použito můstkové metody, která je popsána v teoretické části. V této části měření byl kromě permitivity měřen i ztrátový činitel a to v závislosti jak na frekvenci, tak na teplotě. Měření bylo zautomatizováno, a tudíž zaznamenávání hodnot proběhlo automaticky. Měření proběhlo pomocí přístroje Agilent LCR meter e4980a a elektrodového systému Agilent 16452A.

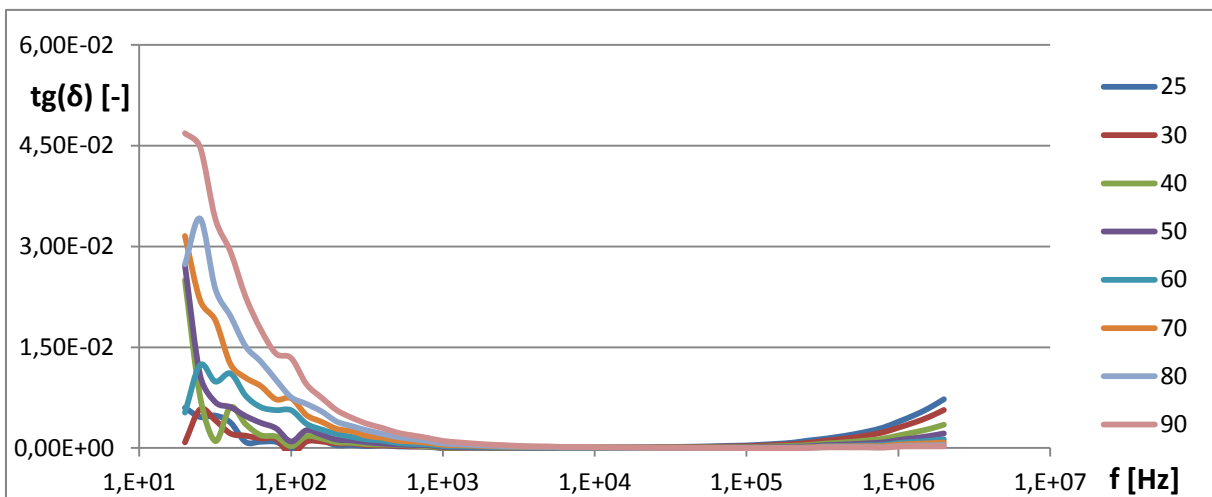
3.3.1 Průběh měření

Před samotným měřením bylo nutné LCR meter kalibrovat podle elektrodového systému. To proběhlo podle návodu v dokumentaci přístroje. Jak už bylo zmíněno, měření bylo automatizováno. Vzorek oleje byl nalit do elektrodového systému a elektrodový systém byl připojen k LCR metru a umístěn do vodní lázně s termostatem a topným tělískem. Jako médium byla použita destilovaná voda. O řízení topného tělíska a zaznamenávání hodnot se staral předem připravený program. Měření probíhalo v rozsahu teplot od pokojové teploty (25 °C) po 90 °C. Vzhledem k velkému množství dat, jsou číselné hodnoty k dohledání na příloženém datovém médiu. Hodnoty uvedené v legendách grafů jsou v °C.

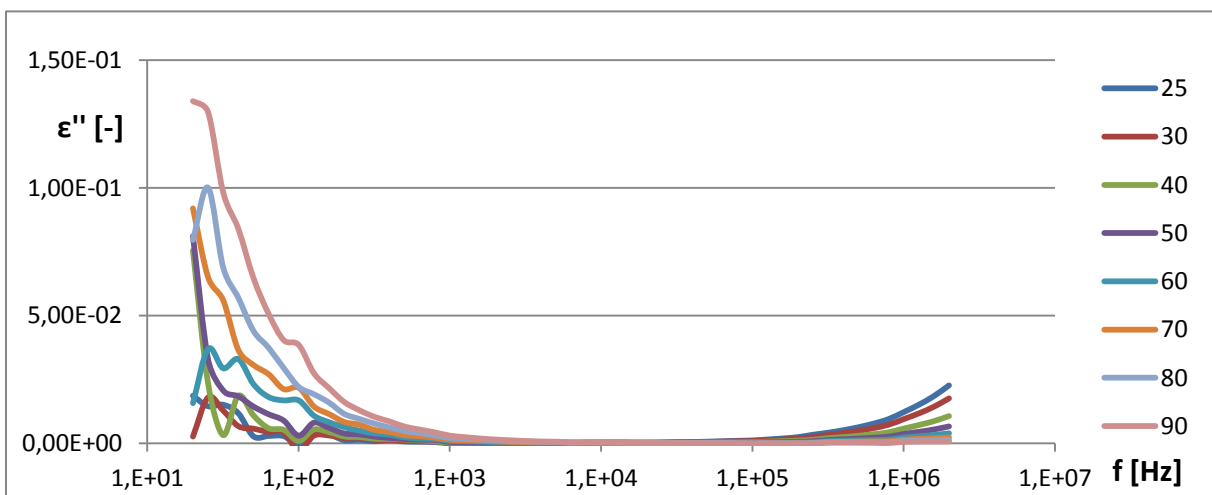
3.3.1.1 Rýžový olej



Obrázek 23 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity rýžového oleje

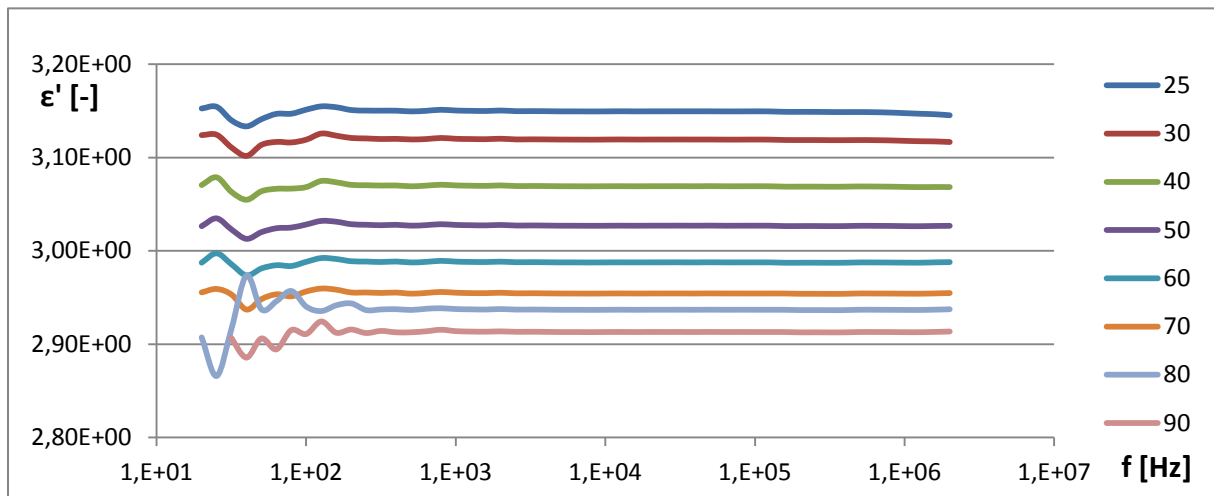


Obrázek 24 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele rýžového oleje

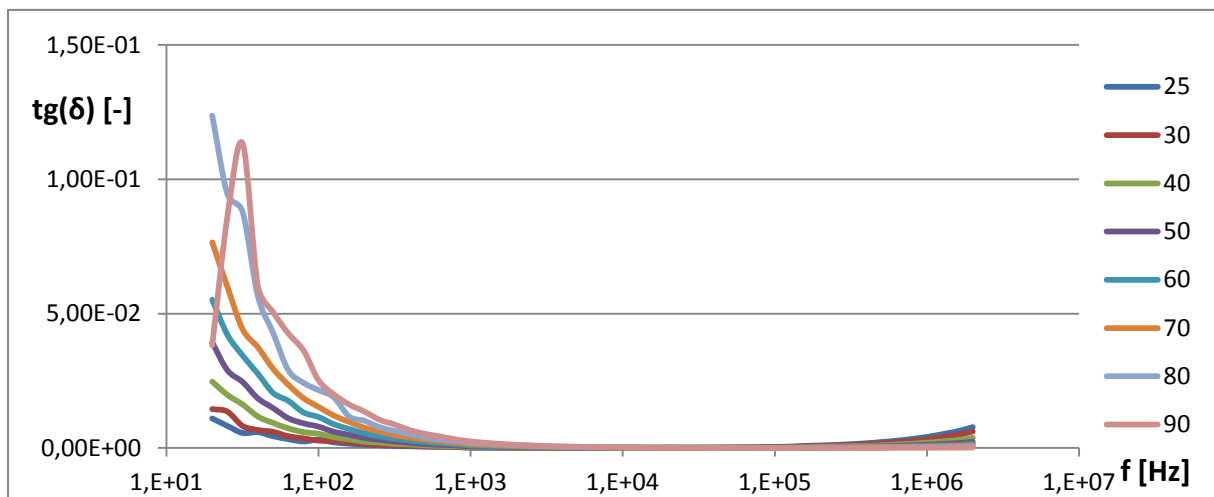


Obrázek 25 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla rýžového oleje

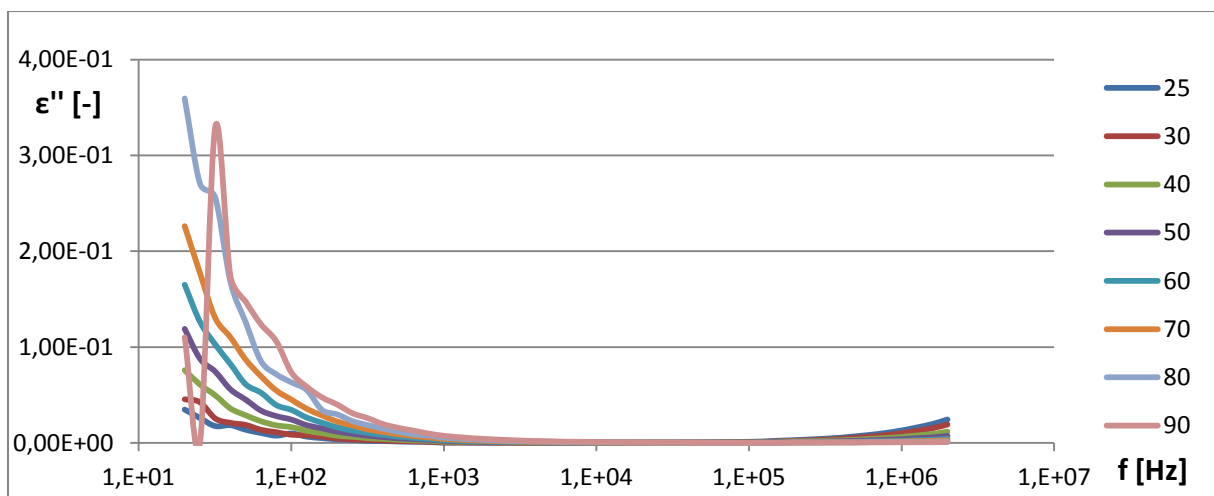
3.3.1.2 Superolein



Obrázek 26 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity palmového oleje

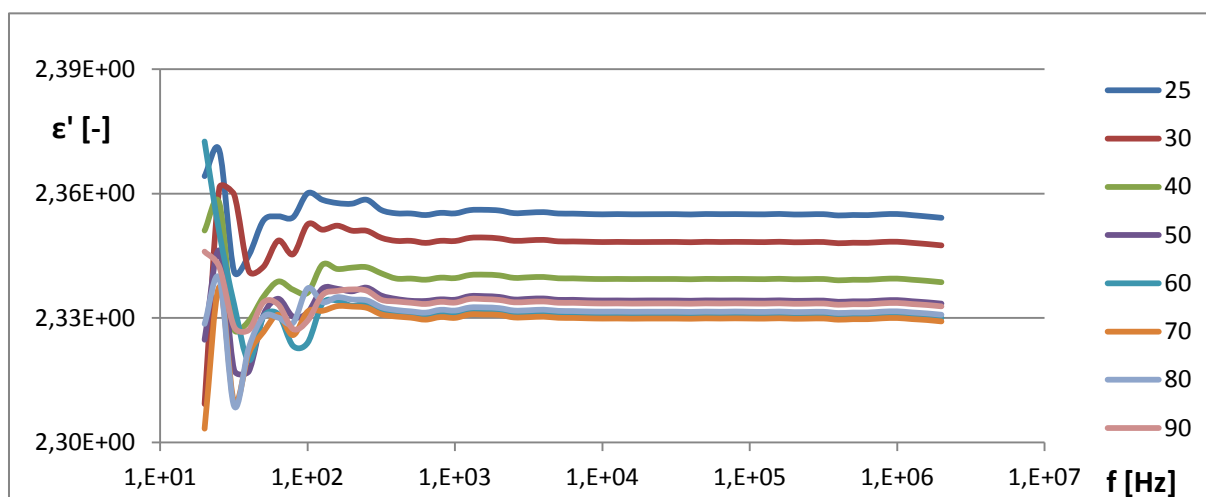


Obrázek 27 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele palmového oleje

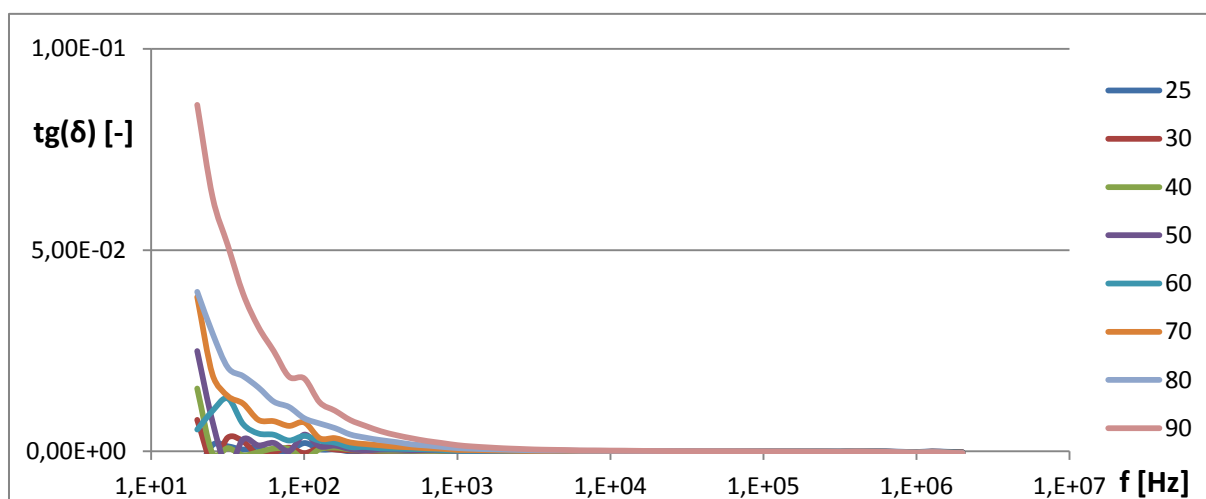


Obrázek 28 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla palmového oleje

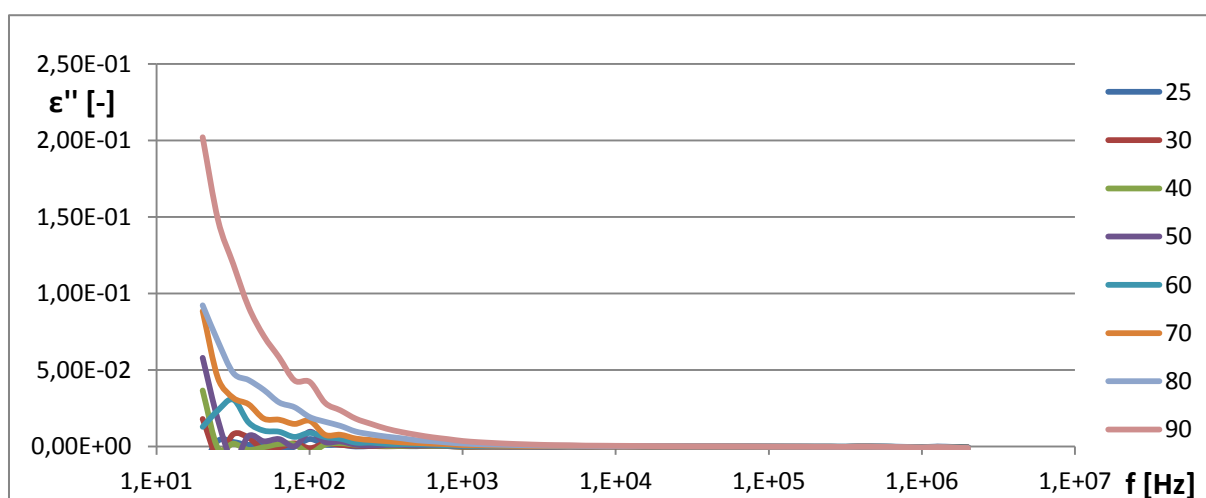
3.3.1.3 Kyselina olejová



Obrázek 29 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity kyseliny olejové

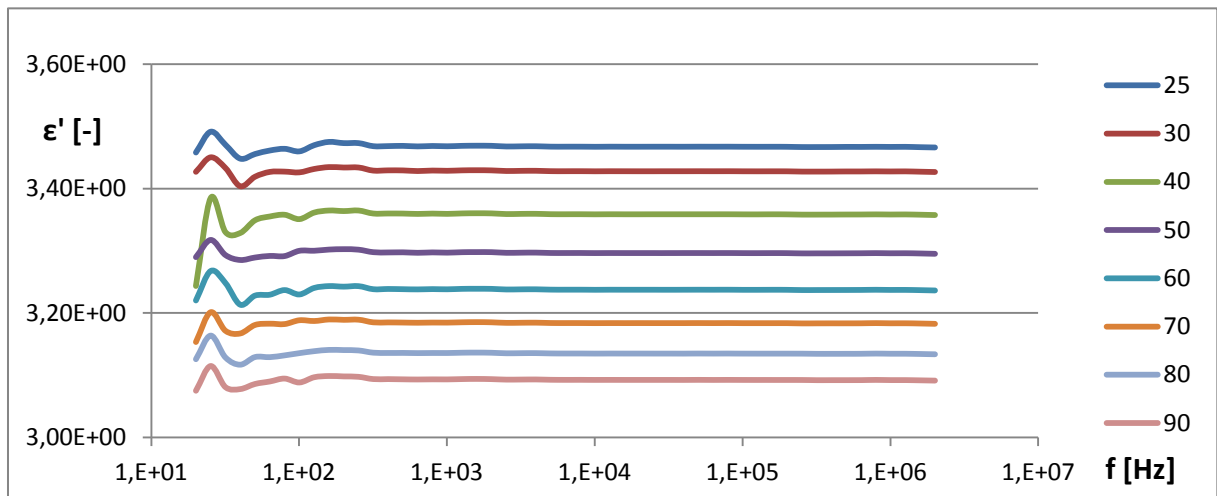


Obrázek 30 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele kyseliny olejové

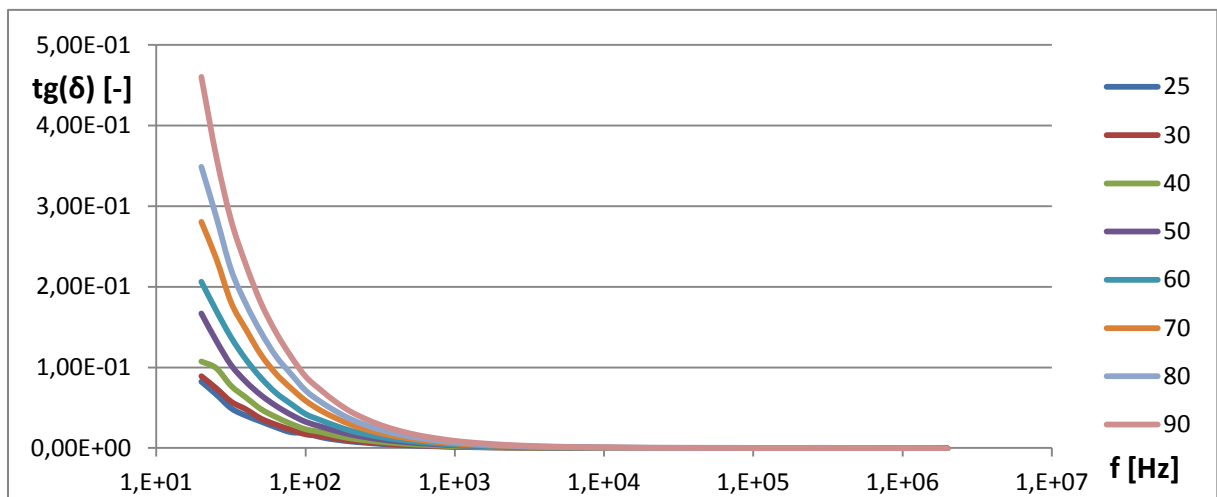


Obrázek 31 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla kyseliny olejové

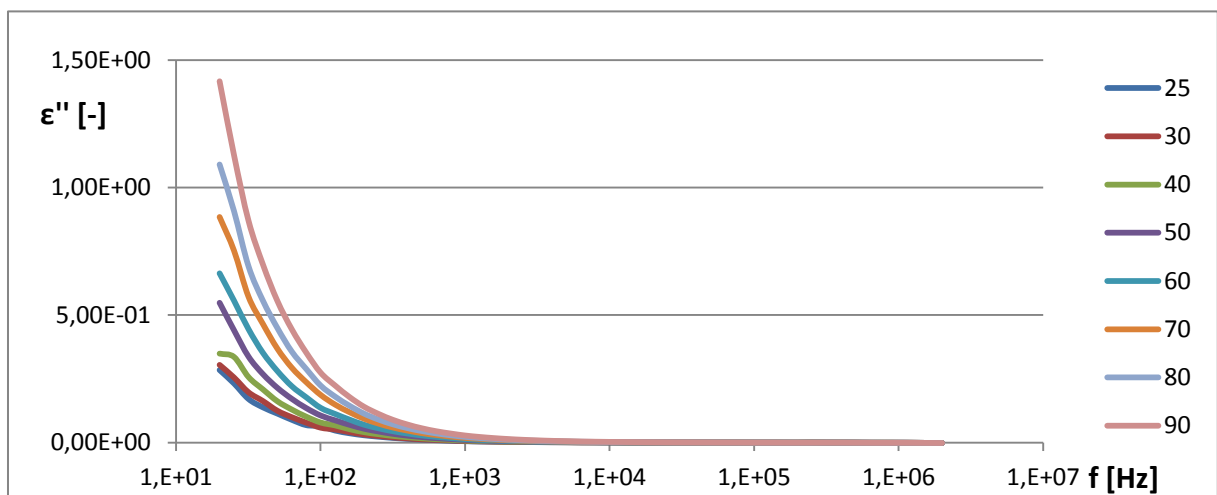
3.3.1.4 Methyl laurát



Obrázek 32 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity methyl laurátu

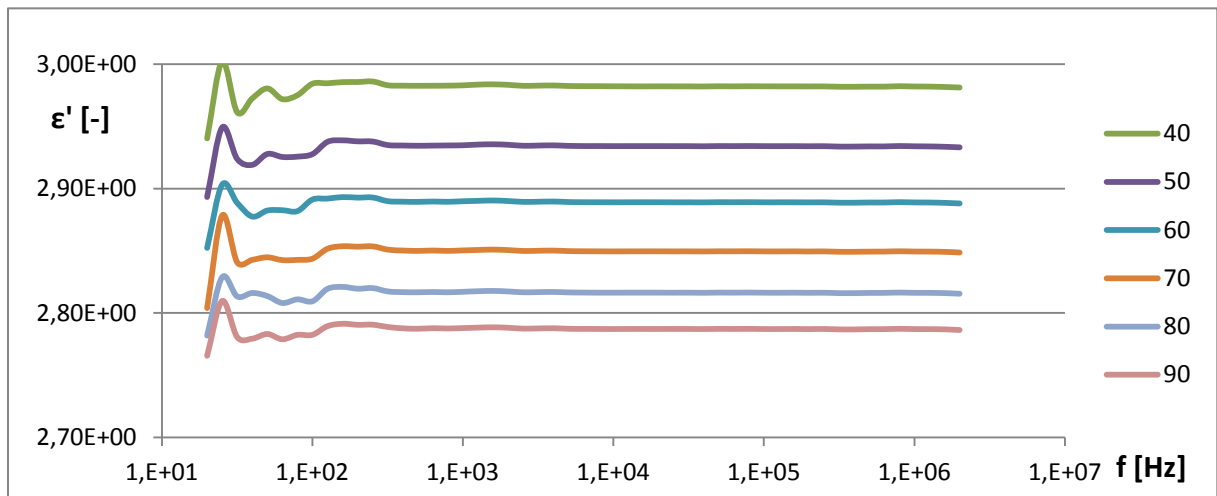


Obrázek 33 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele methyl laurátu

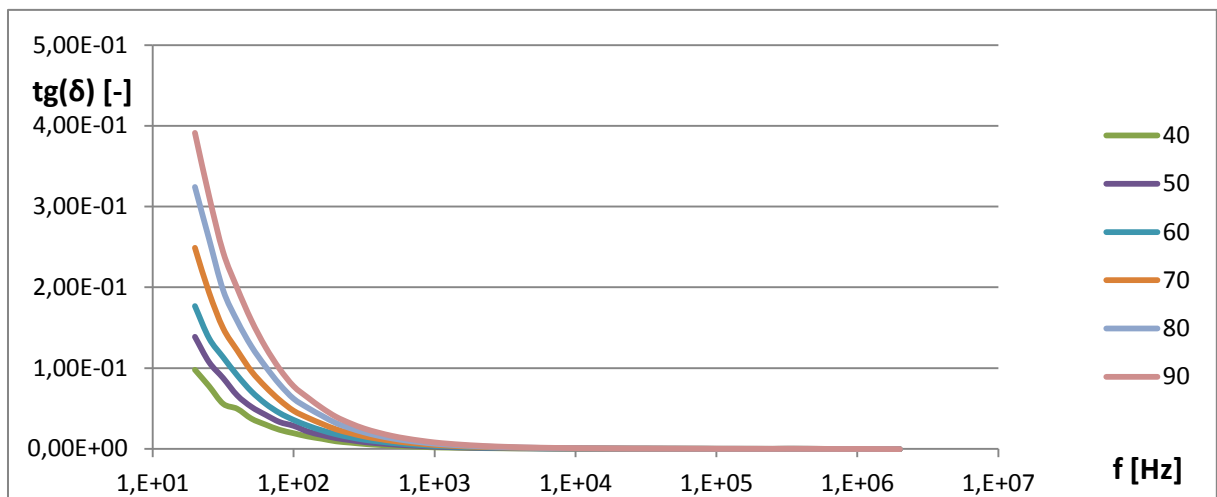


Obrázek 34 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla methyl laurátu

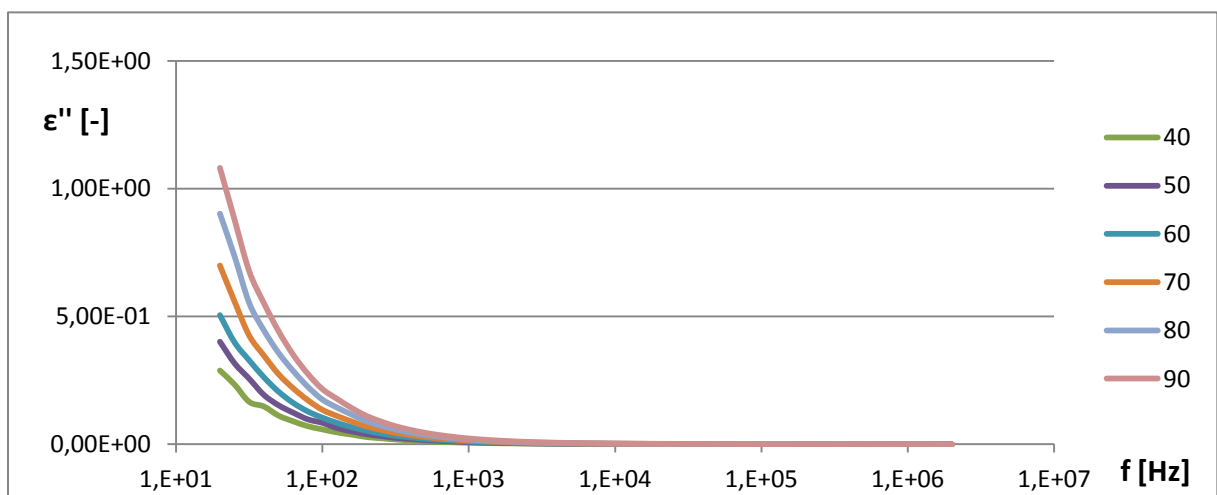
3.3.1.5 Methyl stearát



Obrázek 35 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity methyl stearátu

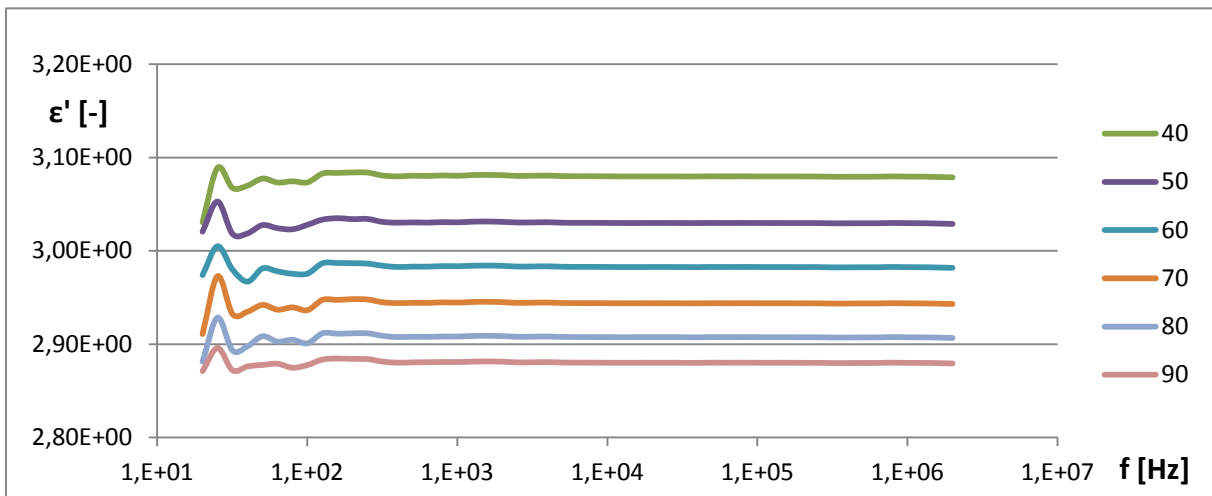


Obrázek 36 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele methyl stearátu

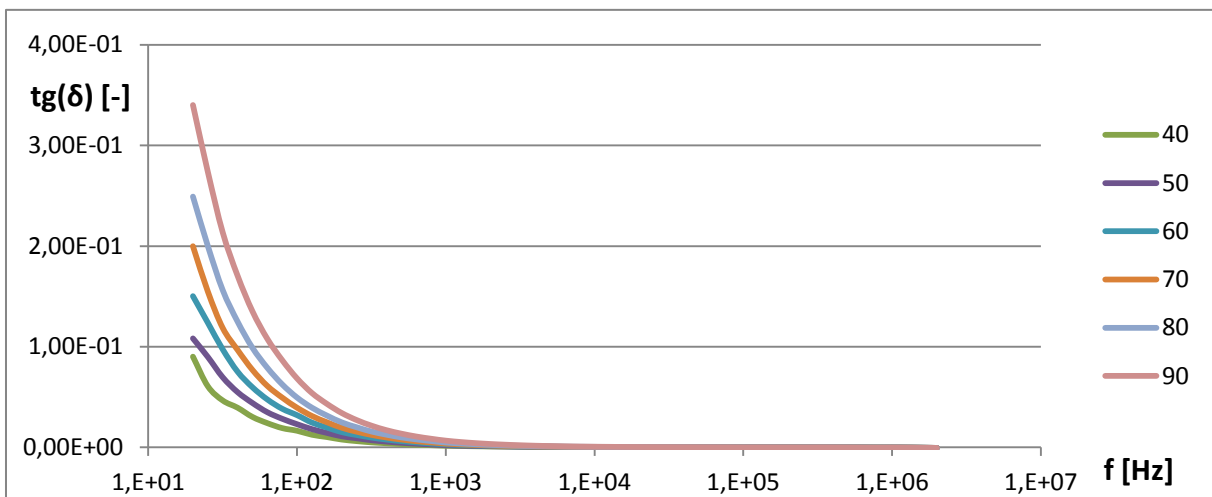


Obrázek 37 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla methyl stearátu

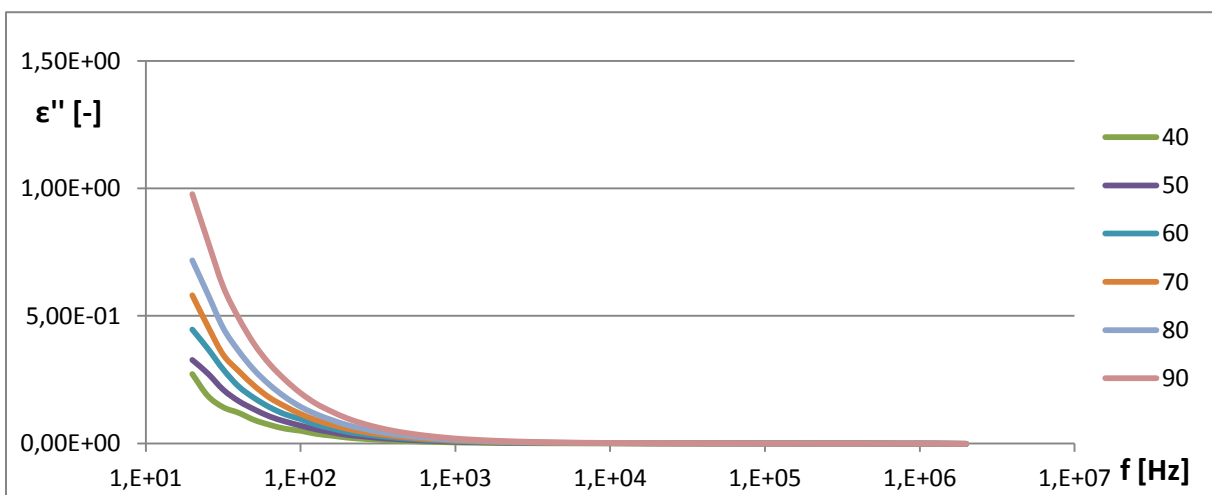
3.3.1.6 Methyl palmitát



Obrázek 38 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity methyl palmitátu

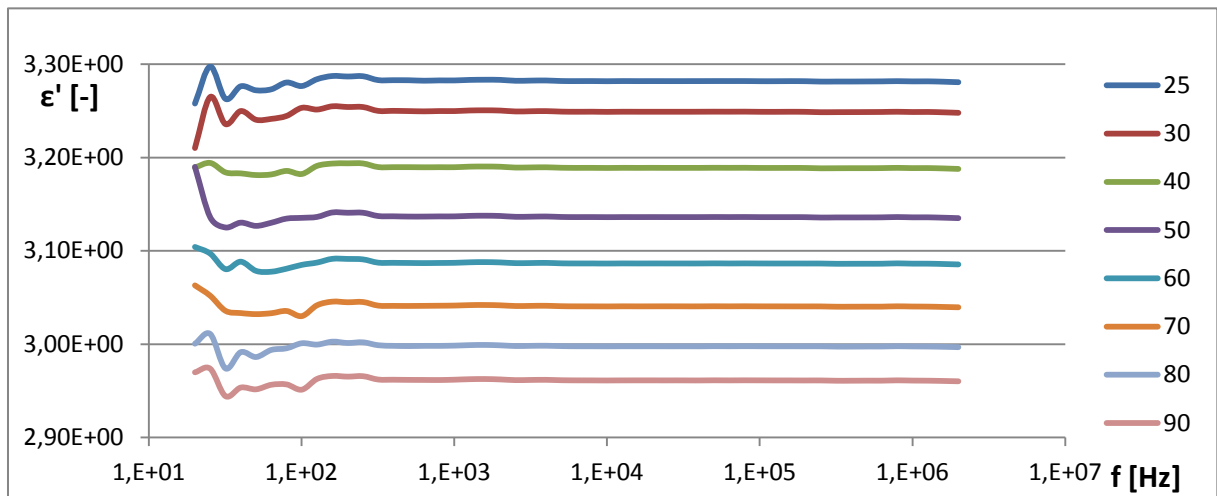


Obrázek 39 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele methyl palmitátu

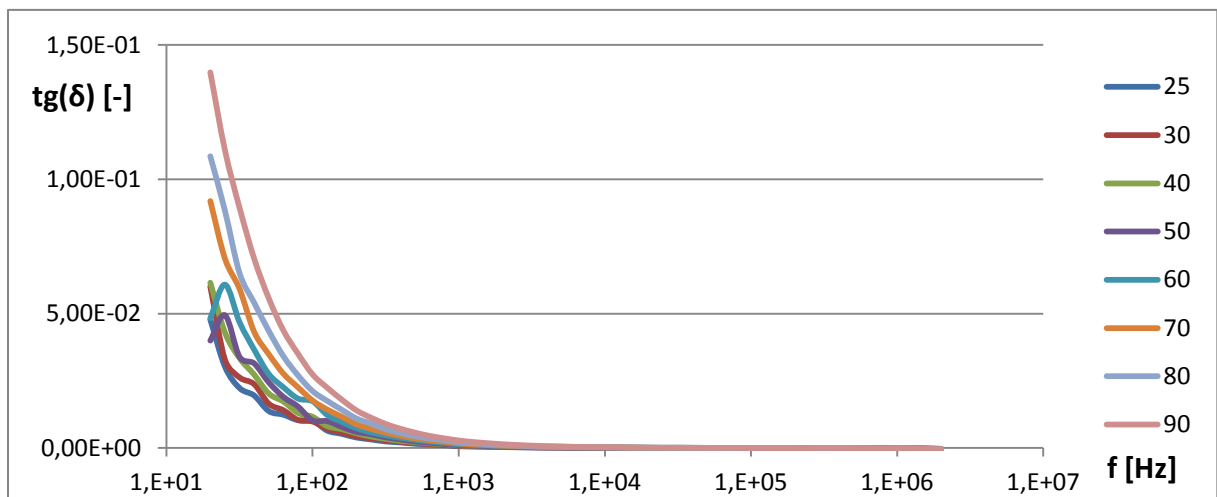


Obrázek 40 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla methyl palmitátu

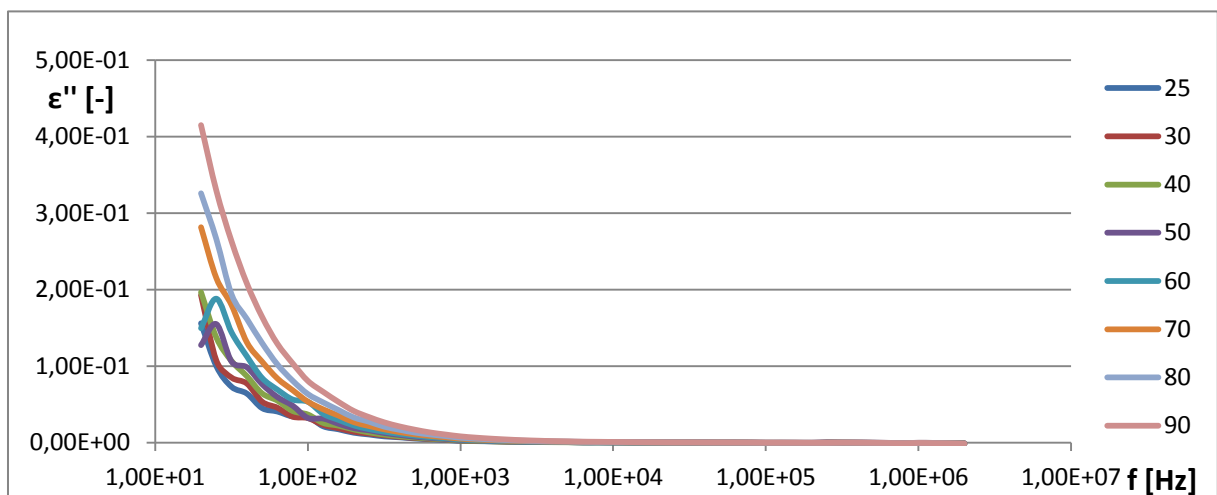
3.3.1.7 Ethyl linoleát



Obrázek 41 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity ethyl linoleátu

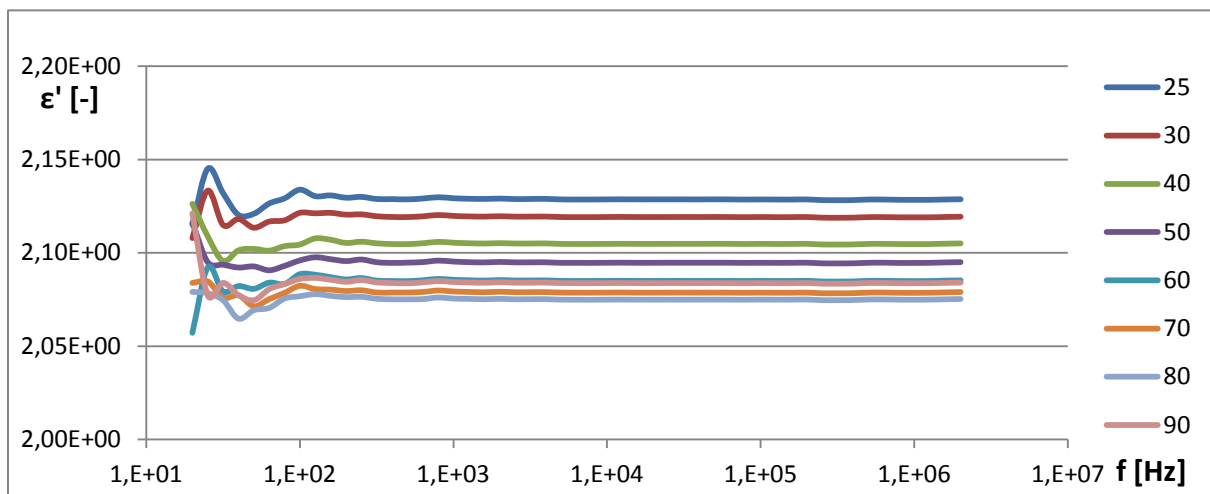


Obrázek 42 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele ethyl linoleátu

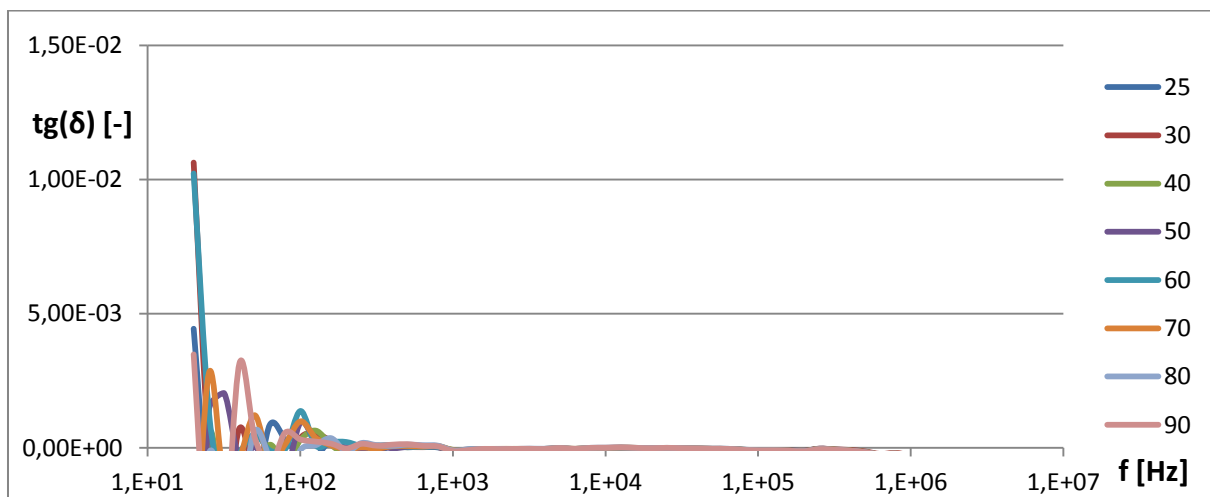


Obrázek 43 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla ethyl linoleátu

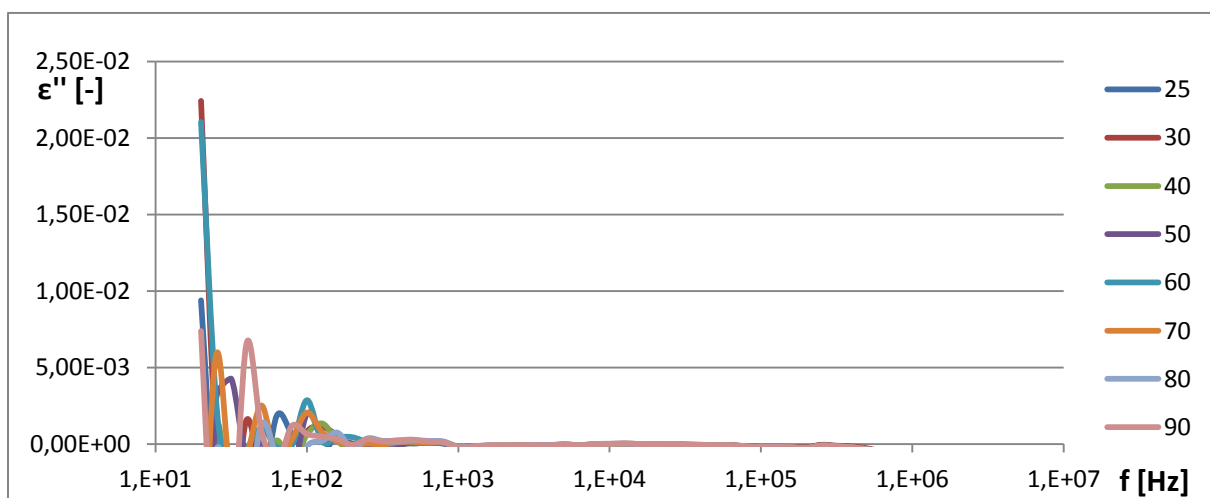
3.3.1.8 Trafo CZ-A



Obrázek 44 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje Trafo CZ-A

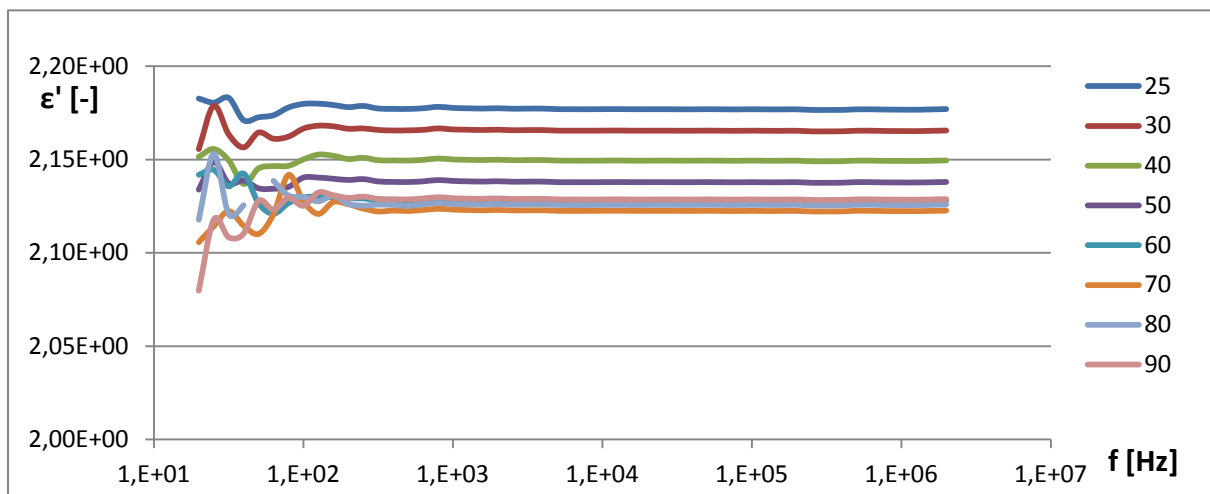


Obrázek 45 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje Trafo CZ-A

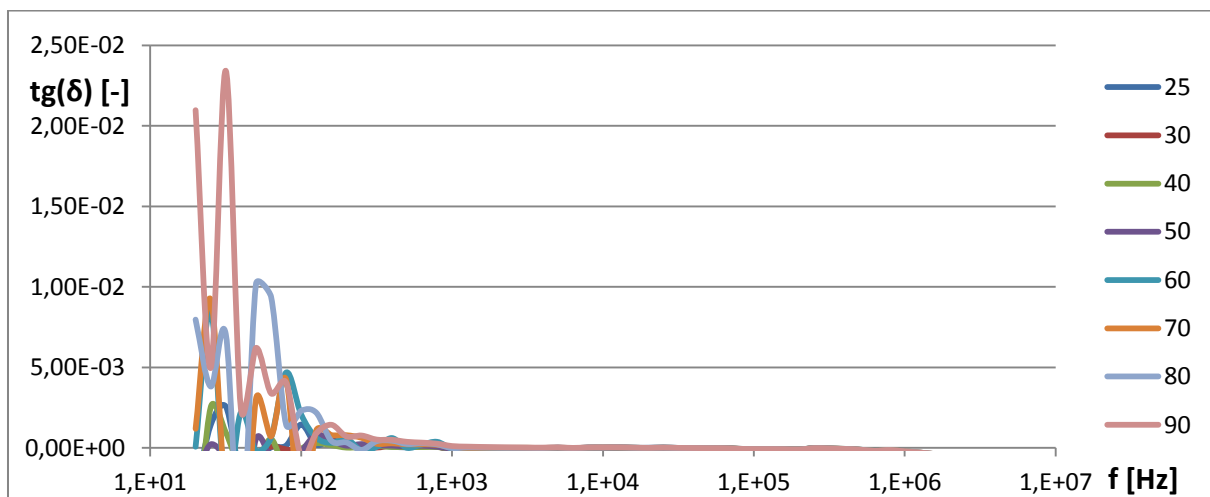


Obrázek 46 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje Trafo CZ-A

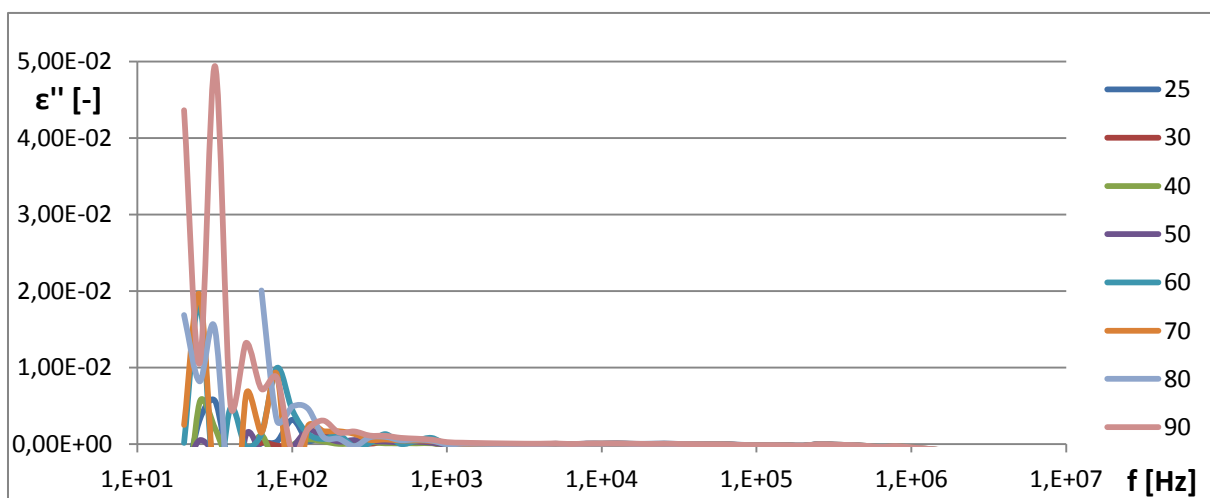
3.3.1.9 Trafo NA



Obrázek 47 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje Trafo NA

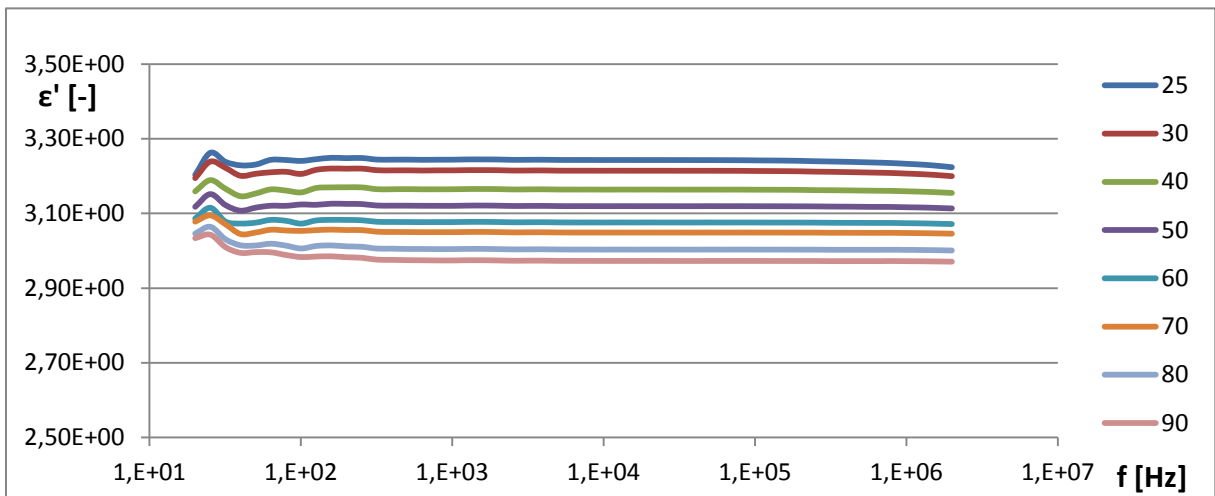


Obrázek 48 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje Trafo NA

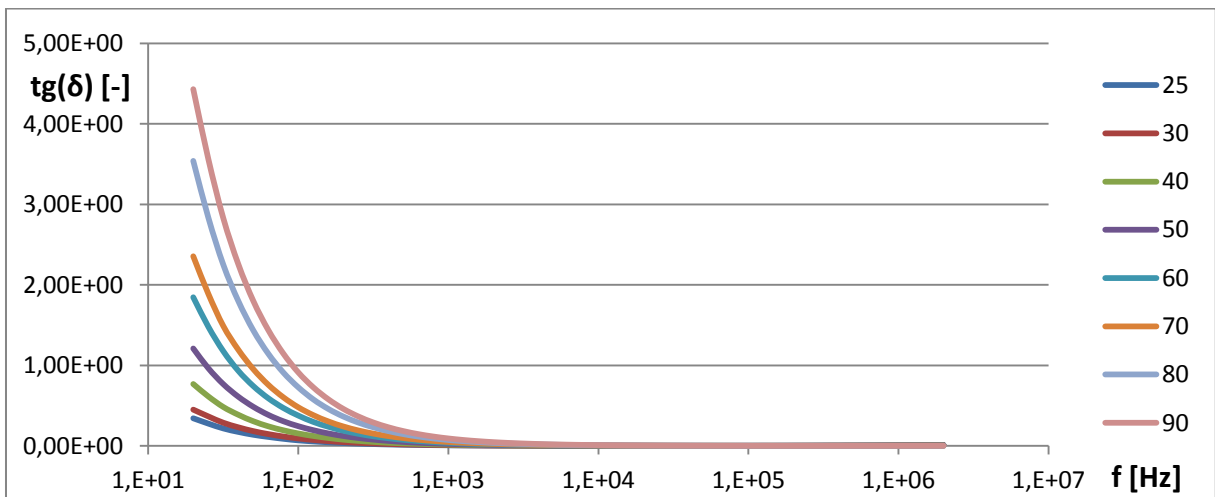


Obrázek 49 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje Trafo NA

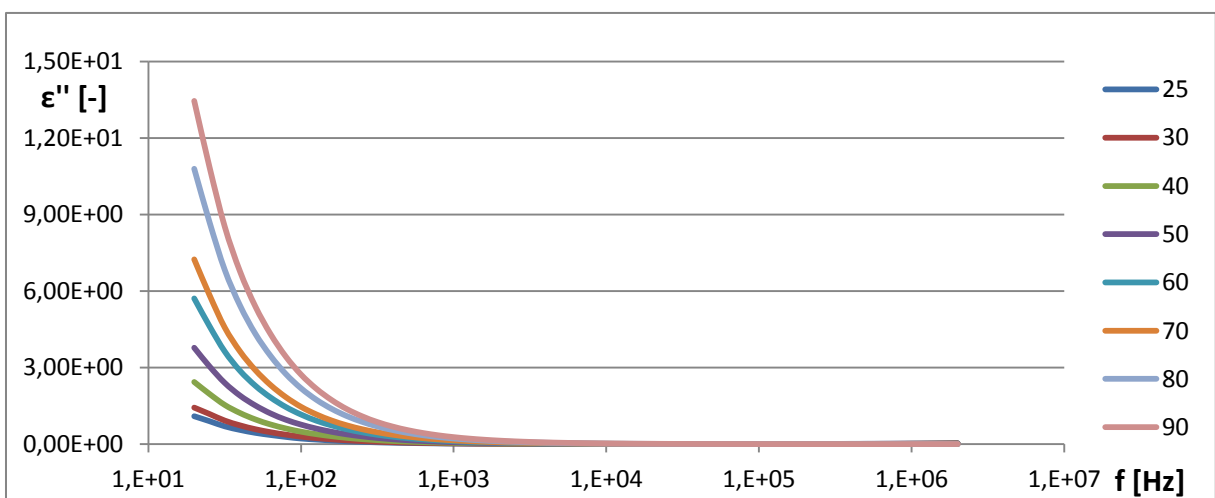
3.3.1.10 HM 46 SYNT



Obrázek 50 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje HM 46 SYNT

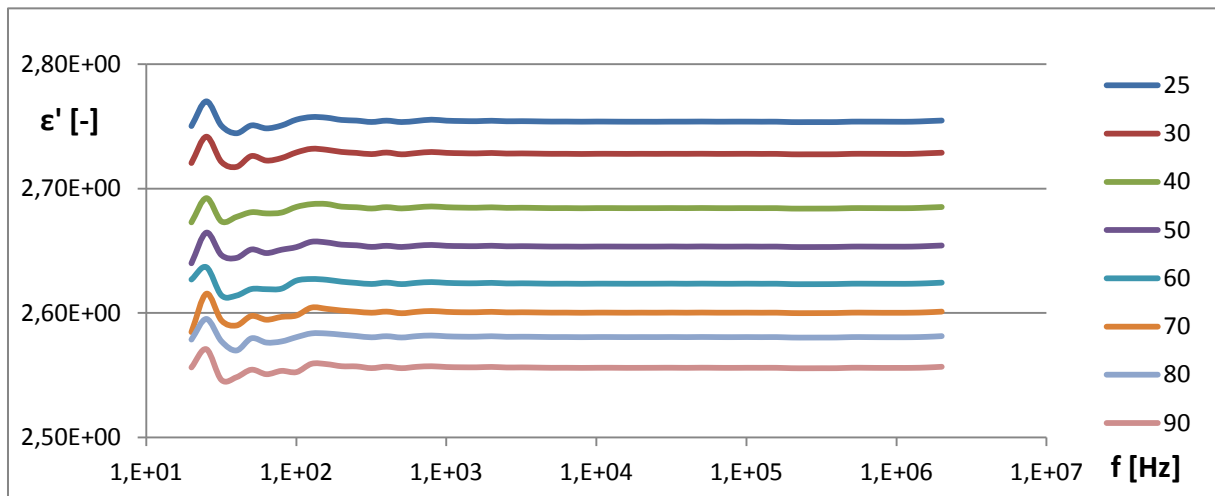


Obrázek 51 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje HM 46 SYNT

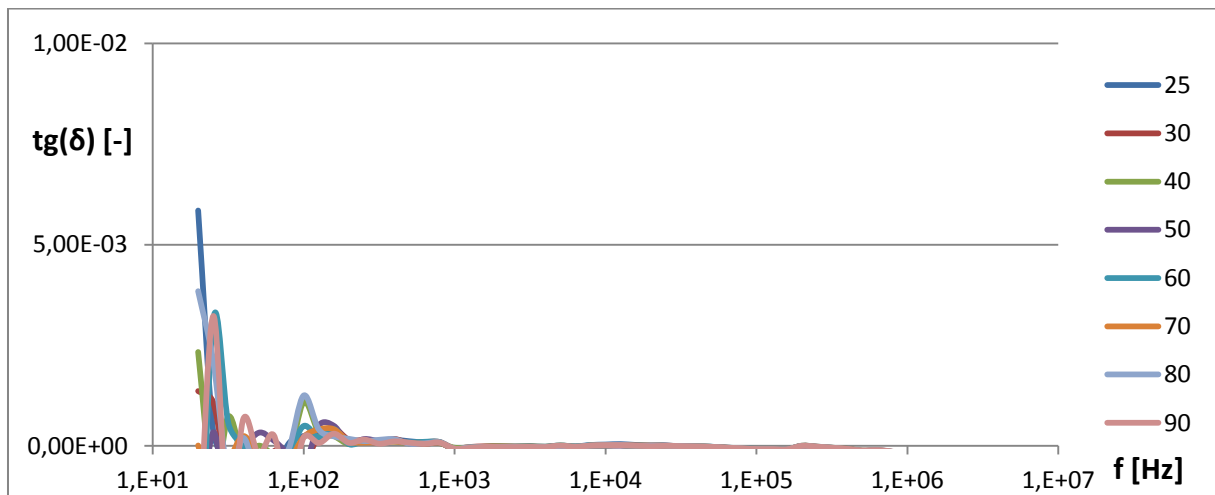


Obrázek 52 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje HM 46 SYNT

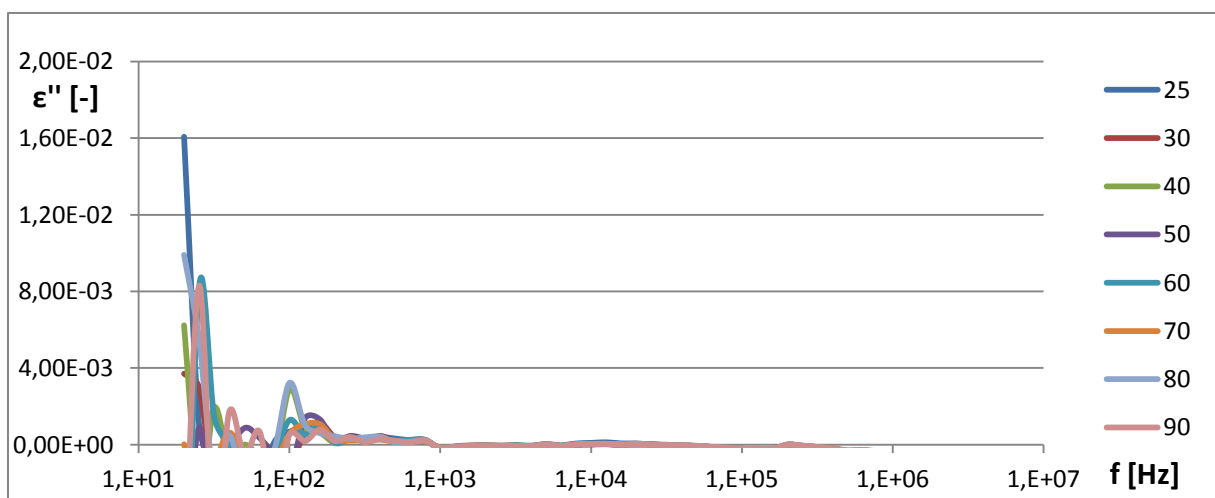
3.3.1.11 Silikon oil M 350



Obrázek 53 - Graf teplotní a frekvenční závislosti relativní permitivity oleje Silikon oil M 350



Obrázek 54 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele oleje Silikon oil M 350



Obrázek 55 - Graf teplotní a frekvenční závislosti ztrátového čísla oleje Silikon oil M 350

Závěr

Cílem práce bylo seznámení se s rostlinnými oleji a jejich složkami a jejich možnostmi využití v elektrotechnickém průmyslu, srovnání s minerálními oleji z pohledu elektrických a neelektrických vlastností, obeznámení se způsobem měření těchto vlastností a průzkum v oblasti současného stavu využití elektroizolačních kapalin na bázi přírodních esterů a jejich diagnostiky.

První část práce se zabývala především teoretickým rozбором rostlinných olejů a jejich složek a jejich srovnáním s oleji minerálními. Bylo zjištěno, že rostlinné oleje jsou oproti minerálním mnohem lépe biologicky odbouratelné, jsou levnější, nicméně mají horší vlastnosti a spoustu nedostatků, které komplikují snahu nahradit jimi minerální oleje. Oproti některým minerálním olejům jsou mnohem těžší, mají nižší bod vzplanutí a bod varu a u některých druhů rostlinných olejů je problém s jejich vysychavostí na vzduchu. Tyto vlastnosti je sice možné upravit modifikátory, ale na úkor ceny a ekologie.

Dále byly v teoretické části popsány metody měření hustoty, viskozity a permitivity. Některé z nich pak byly použity v praktické části. Konkrétně se jedná o metodu měření hustoty na vahách s využitím principu archimédova zákona, o metodu měření viskozity pomocí vibračního viskozimetru a o můstkovou metodu měření permitivity a ztrátového činitele.

Ve druhé části práce pak proběhla již zmiňovaná série měření. Měření probíhalo na Ústavu elektrotechnologie Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Předmětem měření byla teplotní závislost hustoty, dynamické viskozity a teplotní a frekvenční závislost relativní permitivity a ztrátového činitele u předložených vzorků rýžového a palmového oleje, kyseliny olejové, methyl laurátu, methyl stearátu, methyl palmitátu a ethyl linoleátu, minerálních transformátorových olejů Trafo CZ-A a Trafo NA od firmy Mogul a minerálních olejů HM46 SYNT a Silikon oil M350. Bylo zjištěno, že rostlinné oleje mají oproti některým minerálním větší hustotu a tudíž je lze považovat i za těžší. U měřených vzorků, byl spočítán teplotní koeficient objemové roztažnosti a materiálové konstanty A a B pro teplotní závislost viskozity. Zvlnění křivek v části měření viskozity je způsobeno odpařováním oleje. Pro výpočet konstant byly použity nezkrácené části křivek. V části měření permitivity a ztrátového činitele, jsou uvedeny pro všechny měřené vzorky grafy relativní permitivity, ztrátového činitele a ztrátového čísla. Měření vykazovalo v pásmu nízkých frekvencí velké nepřesnosti. Stejně tak i u některých minerálních olejů vykazovalo měření ztrátového činitele velké nepřesnosti a to z důvodu velmi nízké hodnoty této veličiny. Jedná se o materiálovou vlastnost námi neovlivnitelnou. Z důvodu velkého množství číselných dat jsou konkrétní změřené hodnoty dostupné na přiloženém datovém médiu.

Seznam použité literatury

- [1] Víš co jíš. [online]. Dostupné z: http://www.viscojis.cz/teens/index.php?option=com_content&view=article&id=158%3A153&cati
- [2] Substech: Substances & Technologies. [online]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_lubricants
- [3] DIVÍLEK, P. Kapaln  organick  estery v elektrotechnice. Brno: Vysok  u en  technick  v Brn , Fakulta elektrotechniky a komunika n ch technologií, 2013. 33 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [4] IUPAC Compendium of Chemical Terminology (2nd ed.). International Union of Pure and Applied Chemistry. 1997. ISBN 0-521-51150-X. Retrieved 2007-10-31.
- [5] IUPAC, Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book") (1997). Online corrected version: (2006–) "esters".
- [6] *The free dictionary* [online]. 2003 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/>
- [7] KVITEK, E. Materiály pro elektrotechniku [online]. Dostupné z: www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/1s/IMPEE/Skripta_materialy.pdf.
- [8] SPOHNER, M. Diagnostika perspektivn ch elektroizola n ch kapalin. Brno: Vysok  učení technick  v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s. Vedoucí diplomov  práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [9] TOULOV , J. Vlastnosti kapalin na bázi organických esterů. Brno: Vysok  učení technick  v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59 s. Vedoucí diplomov  práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [10] ARTBAUER, J., ŐEDOV , J., ADAMEC, V. Izolanty a izolácie. Prv  vydanie. Bratislava: Alfa, 1969. 620 s.
- [11] M KA, P. Dynamick  viskozita elektroizolačních kapalin. Brno, 2013. 40 s. Vedoucí diplomov  práce Ing. Martin Frk, Ph.D. FEKT VUT v Brně
- [12]  2014 IEEE. *Effect of viscosity and water content on the breakdown strength of vegetable oils* [online]. 2014 [cit. 2015-06-04]. ISSN 978-1-4799-2064-8/14.
- [13]  2014 IEEE. *Electrical and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures* [online]. 2014 [cit. 2015-06-04]. ISSN 978-1-4799-2064-8/14.
- [14]  2014 IEEE. *Electrical and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures* [online]. 2014 [cit. 2015-06-04]. ISSN 978-1-4799-2064-8/14.
- [15] Laboratorn   loha "M ren  hustoty kapalin a drobných t lisek" dostupn  na <http://lide.uhk.cz/prf/ucitel/jezbeda1/navody1/uloha1-4.pdf>

- [16] Mohrovy_vazky. In: *xyz12345* [online]. Integrovaná střední škola Slaný, Hlaváčkovo náměstí 673. Dostupné z: http://xyz12345.wz.cz/tmr/mohrovy_vazky.jpg
- [17] Hustota_mereni. In: *home.tiscali* [online]. Dostupné z: http://home.tiscali.cz/chemie/images/hustota_mereni.gif
- [18] Ohaus-explorer-ex224m-balance. In: *SouthWest Systems* [online]. Dostupné z: <http://www.southwestsystemsuk.com/media/catalog/product/cache/1/image/500x500/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/o/h/ohaus-explorer-ex224m-balance.jpg>
- [19] 559. In: *Helago* [online]. Dostupné z: <http://www.helago-cz.cz/public/content-images/cz/product/559.jpg>
- [20] BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M. *Co je co v povrchové a koloidní chemii: výkladový slovník* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2005. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_viskozity.html
- [21] JIRÁK, J. a spol.: Materiály a technická dokumentace – Část Materiály v elektrotechnice. Elektronická skripta. VUT Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno.
- [22] FOJTÍK, J. Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – laboratorní úloha. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 33 s., 15 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D