



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

TEPLOTNÍ DEGRADACE ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN

THERMAL DEGRADATION OF ALTERNATIVE ELECTRICAL INSULATING LIQUIDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Vodička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Frk, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Tomáš Vodička

ID: 146996

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Teplotní degradace alternativních elektroizolačních kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte literární rešerši o současném stavu v oblasti diagnostiky vlastností a použití alternativních elektroizolačních kapalin v elektrotechnickém průmyslu. Seznamte se s modely popisujícími dobu života izolačního systému vystaveného účinkům tepelného a elektrického namáhání. Prostudujte podstatu fyzikálních dějů odehrávajících se v dielektrických kapalinách a seznamte se s diagnostickými metodami používanými pro stanovení jejich elektrických vlastností ve stejnosměrném a střídavém elektrickém poli podle příslušných ČSN norem.

Analyzujte typické elektrické vlastnosti vybraných vzorků elektroizolačních kapalin, rostlinných olejů, případně jejich jednotlivých složek v podobě vyšších mastných kyselin a esterů v počátečním stavu. Pro jednotlivé druhy kapalin vhodně navrhnete a realizujete zrychlené degradační zkoušky tepelným namáháním, v průběhu kterých monitorujete aktuální stav elektrických vlastností. Vlastnosti jednotlivých kapalin porovnejte z pohledu jejich původu a míry oxidační stability. Výsledné průběhy matematicky aproximujte a podejte jejich možnou fyzikální interpretaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucho práce.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se zabývá teplotní degradací alternativních elektroizolačních kapalin. Teoretická část popisuje současný stav problematiky, elektroizolační kapaliny, jejich klasifikaci a druhy. Jsou zde popsány vlastnosti elektroizolačních kapalin, jejich modely stárnutí a také diagnostické metody podle příslušných norem. V praktické části jsou vybráni zástupci alternativních elektroizolačních kapalin a jsou stanoveny jejich dielektrické parametry v počátečním stavu. Podle naměřených hodnot je vybráno pět kandidátů, pro které je navrhnutá a provedena zrychlená degradační zkouška. V průběhu namáhání jsou sledovány dielektrické parametry vybraných olejů. Naměřené závislosti jsou matematicky aproximovány. V závěru jsou výsledky porovnány a fyzikálně interpretovány z pohledu oxidační stability.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektroizolační kapaliny, minerální oleje, rostlinné oleje, syntetické oleje, degradace, stárnutí, zrychlená degradační zkouška, Tettex 2830

ABSTRACT

This thesis deals with alternative thermal degradation of electrical insulating liquids. The theoretical part describes the current state of the problem, electrical insulating liquids, their classification and types. There are described properties of electrical insulating liquids, their models of aging and diagnostic methods in accordance with the appropriate standards. In the practical part are chosen by representatives of alternative electrical insulating liquids and there are determined their dielectric characteristics in the initial state. According to the measured values is chosen five candidates for which it is designed and implemented an accelerated degradation test. During the test are measured dielectric parameters of the selected oils. Measured dependencies are mathematically approximated. In conclusion, the results are compared and physically interpreted in view of oxidation stability.

KEYWORDS

Insulating fluids, mineral oils, vegetable oils, synthetic oils, degradation, aging, accelerated degradation test, Tettex 2830

VODIČKA, T. *Teplotní degradace alternativních elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 104 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **Teplotní degradace alternativních elektroizolačních kapalin** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 25. května 2016

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 25. května 2016

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Úvod	13
1 Současný stav problematiky	14
2 Elektroizolační kapaliny	18
2.1 Minerální oleje	18
2.2 Rostlinné oleje	20
2.2.1 Nevysychavé oleje	20
2.2.2 Vysychavé oleje	20
2.3 Syntetické oleje	21
2.3.1 Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků	21
2.3.2 Chlorované uhlovodíky	21
2.3.3 Fluorované sloučeniny	22
2.3.4 Organické estery	22
2.3.5 Silikonové polymery	22
2.4 Klasifikace a požadavky kladené na oleje dle norem	23
3 Vlastnosti elektroizolačních kapalin	29
3.1 Elektrické vlastnosti	29
3.1.1 Polarizace dielektrika	29
3.1.2 Dielektrikum v elektrostatickém poli	31
3.1.3 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli	34
3.1.4 Elektrická vodivost a vnitřní rezistivita kapalin	38
3.1.5 Dielektrické ztráty v kapalných izolantech	40
3.1.6 Elektrická pevnost	41
3.2 Fyzikální vlastnosti	42
3.2.1 Barva	42
3.2.2 Viskozita	43
3.2.3 Hustota	44
3.2.4 Bod vzplanutí a tuhnutí	44
3.3 Chemické vlastnosti	44

3.3.1	Číslo kyselosti.....	44
3.3.2	Obsah vody v oleji	45
4	Degradace elektroizolačních kapalin	46
4.1	Teplotní stárnutí.....	46
4.2	Elektrické stárnutí.....	49
4.3	Kombinované stárnutí.....	51
4.3.1	Simoniho model.....	51
4.3.2	Ramuho model.....	54
4.3.3	Fallouho model	54
4.3.4	Crineho model.....	55
4.4	Oxidační stárnutí.....	56
4.5	Kaly.....	56
5	Diagnostika elektroizolačních kapalin	58
5.1	Měření relativní permitivity a ztrátového činitele dle ČSN EN 60247	58
5.1.1	Popis zařízení	58
5.1.2	Měřicí metoda.....	58
5.2	Měření rezistivity při stejnosměrném napětí dle ČSN EN 60247	59
5.2.1	Měřicí metoda.....	59
5.3	Měření průrazného napětí při síťovém kmitočtu.....	60
6	Praktická část.....	62
6.1	Použité přístroje.....	62
6.1.1	Tettex 2830/2831 analyzátor olejů a pevných dielektrik	62
6.1.2	Baur DTA 100 C.....	65
6.2	Použité kapaliny	65
6.2.1	Minerální olej.....	65
6.2.2	Rostlinné oleje	66
6.2.3	Vyšší mastné kyseliny	67
6.3	Postup měření	68
6.4	Naměřené hodnoty a grafy počátečních hodnot	69
6.5	Návrh a realizace zrychlené degradační zkoušky.....	71
6.6	Naměřené hodnoty a grafy v průběhu degradační zkoušky	75
6.7	Výpočty	83

6.8	Vyhodnocení výsledků.....	85
	Závěr	89
	Použitá literatura	90
	Seznam symbolů	93
	Přílohy	94

Seznam obrázků

Obr. 1: Klasifikace izolačních kapalin dle normy ČSN EN 61039 [29]	23
Obr. 2: Závislost statické permitivity na teplotě pro nepolární dielektrické kapaliny [19].....	33
Obr. 3: Závislost statické permitivity na teplotě pro polární dielektrické kapaliny [19]	34
Obr. 4: Frekvenční závislost ε' , ε'' a $tg\delta$ při relaxační polarizaci podle Debyeho teorie [19].....	36
Obr. 5: Cole-Cole diagram [19].....	36
Obr. 6: Závislosti ztrátového činitele $tg\delta$ na teplotě (graf (a)) a frekvenci (graf (b)) nepolárních kapalných izolantů [14].....	40
Obr. 7: Teplotní (graf a)) a kmitočtová (graf b)) závislost ztrátového činitele $tg\delta$ polárních kapalných izolantů s různými parametry frekvence a teploty [14]	41
Obr. 8: Teplotní závislost elektrické pevnosti minerálního oleje s různou koncentrací vody v oleji [19].....	42
Obr. 9: Demonstrativní škála barev dle normy ISO 2049 [23]	43
Obr. 10: Gradient rychlosti [20]	43
Obr. 11: Proces aktivační energie [25].....	47
Obr. 12: Simoniho model – model životnosti izolačních materiálů pro kombinované elektrické a tepelné namáhání [11]	53
Obr. 13: Crineho model stárnutí s využitím dvojité potenciálové jámy	55
Obr. 14: Uspořádání elektrod při měření průrazného napětí kapalných izolantů [19] .	60
Obr. 15: Analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830 [1].....	63
Obr. 16: Uživatelské prostředí analyzátoru Tettex 2830.....	63
Obr. 17: Zkušební komora Tettex 2903 [2].....	64
Obr. 18: Schéma zkušební komory Tettex 2903 [2]	64
Obr. 19: Baur DTA 100C [9].....	65
Obr. 20: Teplotní závislost ztrátových činitelů olejů v počátečním stavu	69
Obr. 21: Teplotní závislost relativních permitivit ε' olejů v počátečním stavu.....	70
Obr. 22: Závislost logaritmu vnitřních rezistivit ρ_v olejů na převrácené hodnotě teploty v počátečním stavu.....	70
Obr. 23: Střední hodnoty průrazných napětí olejů v počátečním stavu	71
Obr. 24: Realizace degradační zkoušky	73

Obr. 25: Promývací baňky naplněné oleji a měděným drátem, zleva: řepkový olej, slunečnicový olej, TRAF0-CZA, FRITO a rýžový olej	74
Obr. 26: Detail degradační soustavy	74
Obr. 27: Naměřené závislosti $tg\delta = F(T)$, $\varepsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$ olejů po 100 h dlouhém namáhání	76
Obr. 28: Naměřené závislosti $tg\delta = F(T)$, $\varepsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$ olejů po 250 h dlouhém namáhání	77
Obr. 29: Naměřené závislosti $tg\delta = F(T)$, $\varepsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$ olejů po 500 h dlouhém namáhání	78
Obr. 30: Časové průběhy hodnot ztrátových činitelů olejů po zrychlené degradační zkoušce měřené při pokojové teplotě.....	79
Obr. 31: Časové průběhy hodnot ztrátových činitelů olejů po zrychlené degradační zkoušce měřené při teplotě 90°C	79
Obr. 32: Časové průběhy hodnot relativních permitivit olejů po zrychlené degradační zkoušce měřené při pokojové teplotě.....	80
Obr. 33: Časové průběhy hodnot relativních permitivit olejů po zrychlené degradační zkoušce měřené při teplotě 90 °C	80
Obr. 34: Časové průběhy hodnot vnitřních rezistivit olejů po zrychlené degradační zkoušce měřené při pokojové teplotě.....	81
Obr. 35: Časové průběhy hodnot vnitřních rezistivit olejů po zrychlené degradační zkoušce měřené při teplotě 90 °C	81
Obr. 36: Srovnání naměřených středních hodnot průrazných napětí olejů v počátečním stavu a po degradačním namáhání dlouhém 500 h	82
Obr. 37: Barva vzorků po namáhání dlouhém 100h. Zleva: řepkový olej, slunečnicový olej, TRAF0-CZA, olej FRITO a rýžový olej	87
Obr. 38: Barva vzorků po namáhání dlouhém 250h. Zleva: řepkový olej, slunečnicový olej, TRAF0-CZA, olej FRITO a rýžový olej	87
Obr. 39: Barva vzorků po namáhání dlouhém 500h. Zleva: řepkový olej, TRAF0-CZA, olej FRITO a rýžový olej	87

Seznam tabulek

Tab. 1: Souhrn vlastností a použití elektroizolačních kapalin, převzato z [10].....	14
Tab. 2: Třídy ropných a alternativních produktů [5]	23
Tab. 3: Kategorie zařízení O – Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí 400 kV a výše. Přejzato z [4].....	25
Tab. 4: Kategorie zařízení A – Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí nad 170 kV a do 400 kV. Přejzato z [4].....	25
Tab. 5: Kategorie zařízení B - Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí nad 72,5 kV až do 170 kV včetně. Přejzato z [4].	26
Tab. 6: Kategorie zařízení C – Výkonové transformátory/reaktory pro VN/NN aplikace. Přejzato z [4].	26
Tab. 7: Kategorie zařízení D – Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí nad 170 kV. Přejzato z [4].	27
Tab. 8: Kategorie zařízení E – Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí až do 170 kV včetně. Přejzato z [4].....	27
Tab. 9: Kategorie zařízení F – Nádoby přepínačů odboček pod zatížením zahrnující kombinované nádoby pro volič a přepínač. Přejzato z [4].	28
Tab. 10: Kategorie zařízení G - Olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí do 72,5 kV včetně. Přejzato z [4].	28
Tab. 11: Metody zrychlených zkoušek stárnutí [33].....	72
Tab. 12: Srovnání průběžných hodnot dielektrických parametrů podle délky namáhání pro pokojovou teplotu (~ 25 °C) a 90 °C	82
Tab. 13: Naměřené teplotní závislosti ztrátového činitele $tg\delta$ olejů v počátečním stavu	96
Tab. 14: Naměřené teplotní závislosti relativní permitivity ε' olejů v počátečním stavu	96
Tab. 15: Naměřené teplotní závislosti vnitřní rezistivity ρ_v olejů v počátečním stavu .	97
Tab. 16: Naměřené hodnoty průrazných napětí U_p , jejich středních hodnot s , směrodatných odchylek a variačních koeficientů v olejů v počátečním stavu	98
Tab. 17: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 100 h dlouhém namáhání	99
Tab. 18: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 250 h dlouhém namáhání	99
Tab. 19: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 500 h dlouhém namáhání	99

Tab. 20: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 100 h dlouhém namáhání	100
Tab. 21: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 250 h dlouhém namáhání	100
Tab. 22: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 500 h dlouhém namáhání	100
Tab. 23: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 100 h dlouhém namáhání	101
Tab. 24: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 250 h dlouhém namáhání	101
Tab. 25: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 500 h dlouhém namáhání	101
Tab. 26: Naměřené hodnoty průrazných napětí U_p , jejich středních hodnot s , směrodatných odchylek a variačních koeficientů v olejů po 500 h dlouhém namáhání	102
Tab. 27: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů v počátečním stavu	103
Tab. 28: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 100 h dlouhém namáhání	103
Tab. 29: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 250 h dlouhém namáhání	104
Tab. 30: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 500 h dlouhém namáhání	104

Úvod

Diplomová práce se zabývá teplotní degradací alternativních elektroizolačních kapalin. Z dnešního pohledu nejlepší elektroizolační kapalinou jsou minerální oleje. Ty se však získávají z ropy. Jelikož se jedná o ropné produkty, jsou biologicky špatně odbouratelné. Zásoby ropy se navíc tenčí, to znamená, že je vhodné se soustředit na výzkum v hledání nových vhodných alternativ. Tyto alternativní elektroizolační kapaliny však nejsou dobře prozkoumány z hlediska jejich stárnutí při dlouhodobém provozu zařízení. Proto je vhodné analyzovat tyto kapaliny zrychlenými degradačními zkouškami, které stanoví vhodnost dané kapaliny pro elektrotechnické zařízení. V současné době existuje mnoho výzkumů studujících chování alternativních elektroizolačních kapalin na bázi přírodních esterů. Pouze málo z nich se však věnuje kapalinám získávaným z plodin.

Diplomová práce se soustředí na výběr vhodných kandidátů alternativních elektroizolačních kapalin na bázi přírodních esterů. Největším faktorem způsobující stárnutí kapalin je teplota. Výkonová zařízení požadují skvělé izolační vlastnosti při zachování dobrých vlastností jako chladicího média. V experimentu je navržena a provedena zrychlená teplotní degradační zkouška. Dosažené výsledky jsou matematicky aproximovány a je podána jejich fyzikální interpretace. V závěru jsou uvedena konkrétní doporučení.

1 Současný stav problematiky

Elektroizolační kapaliny jsou důležitou součástí elektroizolačních systémů i mnoha typů elektrických zařízení, jako jsou transformátory, kabely, kondenzátory atd. Každá aplikace vyžaduje elektroizolační kapaliny se specifickými elektrickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Výzkum v oblasti olejem plněných kabelů a výkonových vypínačů se pozastavil. V dnešní době jsou nahrazovány extrudované izolované kabely právě olejovými kabely. Technologie vysokonapěťových vypínačů přešla na využívání plynu SF₆ a využívání vakua. V oblasti elektroizolačních olejů zaujímají největší postavení oleje minerální. Vývoj minerálních olejů tvá už téměř 100 let. Požadavky na jakost a stabilitu byly stále přísnější, což způsobilo zdokonalení kvality rafinační technologie pomocí katalytického hydrokrakování. Vzhledem k výborným vlastnostem, dostupnosti a nízkým nákladům neměl konkurenci. Vysokým rizikem je jeho toxicita a hořlavost. Vývoj vedl k vysokoteplotním minerálním olejům k dnes už nepoužívaným polychlorovaným bifenilům (PCB) a dále k nehořlavým halogenovým látkám jako je perchloretylen, které se kvůli vysokým toxickým rizikům nepoužívají. Rostoucí spotřebou olejů rostlo riziko ekologických havárií a tím se soustředil vývoj na biologicky odbouratelných olejů s dobrou požární bezpečností a materiálovou udržitelností. Začali se používat syntetické estery pro protipožární aplikace, uhlovodíkové kapaliny (s biologickou odbouratelností 30%), silikonové oleje, polyolefiny, estery založené na pentaerythritolu a rostlinné oleje (plně biologicky odbouratelné). Vývojem se zajistil spolehlivý dlouhodobý výkon biologicky odbouratelných kapalin s dlouhou životností a dobrými vlastnostmi. I přes to že minerální oleje přetrvávají, současný trend tíhne k používání alternativ. Použití kapalin určuje daná aplikace. V Tab. 1 je uveden přehled charakteristických vlastností a výčet možných použití známých druhů kapalin.[10]

Tab. 1: Souhrn vlastností a použití elektroizolačních kapalin, převzato z [10]

Kategorie	Typ kapaliny	Aplikace	Vybrané vlastnosti
Minerální oleje	Naftenické, Parafinické	Kapalinou plněné energetické zařízení (transformátory, výkonové vypínače, přepínače odboček atd.)	Dobrá odolnost proti oxidaci. Dobrý viskozitní index. Relativně nízká teplota hoření. Nízká tolerance vlhkosti. Možná přítomnost korozivní síry.
Uhlovodíky s vysokou molekulovou hmotností	Parafinické	Transformátory, přepínače odboček	Vysoká teplota vzplanutí
Rostlinné oleje	Ricinový, sojový, bavlněný, palmový atd.	Kondenzátory, transformátory	Nízké dielektrické ztráty u frekvencí vyšších než 1 kHz. Snadno biologicky rozložitelné. Nízká oxidační stabilita

Syntetické kapaliny			
Syntetické uhlovodíky	Polybuteny	Kabely	Nízké dielektrické ztráty. Nastavitelná viskozita.
	Alkylbenzeny	Průchodky, kabely, kapacitní děliče	Absorbování plynů při částečných výbojích. Dobrá elektrická pevnost.
	Alkylované uhlovodíky s kondenzovanými aromatickými kruhy (DIPN)	Kondenzátory	Dobrá elektrická pevnost
	Alkyl-bifenyly (MIPB)	Kondenzátory	Snadno biologicky rozložitelné. Absorbování plynů při částečných výbojích.
	Alkyldiaryl alkany (BT, DBT)	Kondenzátory	Absorbování plynů při částečných výbojích.
Halogenované uhlovodíky	Askarel (PCB – polychlorované bifenyly)	Kondenzátory a distribuční transformátory	Nehořlavé. Teplotně stabilní.
	Polychoro-difenyl methany	Transformátory	Nehořlavé. Biologicky odbouratelné. Teplotně stabilní.
	Polychoro-alkany	Transformátory	
Silikonové oleje	Poly-dimetylsiloxan (PDMS), poly- metylfenyl siloxan	Vedení a distribuční kondenzátory	Dobry viskozitní index. Vysoká teplota vzplanutí. Absorbování plynů při částečných výbojích. Vysoká oxidační stabilita. Nízká biologická odbouratelnost.
Organické estery	Jednoduché estery	Kondenzátory	Relativní permitivita (při 20°C vyšší než 5)
	Ftaláty	Náhrada za PCB	Používá se k zvýšení teploty vzplanutí pro některé kapaliny
	Komplexní estery (tetraester nebo	Vedení a distribuční	Vysoká teplota vzplanutí. Vysoká tolerance

	pentaerythritol)	transformátory	vlhkosti. Snadná biologická odbouratelnost. Vysoká oxidační stabilita.
Ostatní kapaliny	Ethery (alkyl-difenylether, ditolylether)	Kondenzátory	Relativní permitivita (při teplotě 20°C vyšší než 3). Přízpůsobivost.
	Nanokapaliny	Transformátory	Přízpůsobivost
	Smišené kapaliny	Kondenzátory, transformátory.	Přízpůsobivost
	Kryogenní dielektrická kapalina (dusík)	Supravodivost a kryogenní aplikace	Snížení nebo potlačení Joulova tepla.

Alternativní elektroizolační kapaliny, které se v současné době na trhu nachází, se hojně používají v elektroizolační technice. Jejich největší předností je dobrá biologická odbouratelnost. Jejich použití je však omezeno pouze na aplikace vhodné pro dané kapaliny (aplikace u zařízení nižších napětí atd.). Jako alternativu lze také uvažovat průmyslové oleje motorové, hydraulické, letecké, které se vyznačují vysokou kvalitou. Některé z těchto olejů mohou být vhodné i pro elektrotechniku. Jejich použití se ale nejdříve musí otestovat laboratorně. V současnosti je na trhu dostupný MĚRO, jedná se o metylester kyseliny řepkové oleje. Svými vlastnostmi se více hodí jako automobilové palivo, ale přidáním různých aditiv a dalšími úpravami by ho šlo použít jako elektroizolační kapalinu pro nízké napětí. Další kandidáti na trhu jsou etylester řepkové oleje a jeho směs s ropnými uhlovodíky a netoxické silikonové elektroizolační kapaliny, nemísitelné s jinými oleji. Syntetické esterové elektroizolační kapaliny, které se vyskytují na našem trhu, jsou např. MIDEL 7131 (Sun Oil Company), ARAL 4569 (ARAL ČR), SHELL FLUID 4600 (Shell ČR). Pořizují se za vyšší cenu, jsou dobře odbouratelné, bohužel mají vyšší hustotu a viskozitu. Světový výzkum v oboru alternativních elektroizolačních kapalin se soustřeďuje v Japonsku a v USA. Každá země se soustřeďuje na výzkum rostlinných olejů z plodin, které se v dané zemi nejvíce pěstují. V USA se jedná o slunečnicový, řepkový a kukuřičný olej, v Japonsku a jiných asijských zemích se věnují palmovému oleji, kokosovému oleji a oleji ze dřeva stromu Pongamia.[24]

V současné době se výzkum dále soustřeďuje na výzkum aditiv a nanokapalin. Nanokapaliny představují kapaliny, do kterých bylo přidáno aditivum obsahující nanočástice o rozměrech 1 až 100 nm, a tyto částice jsou rozptýleny v celém objemu kapaliny. Tyto částice značně ovlivní dielektrické a teplotní vlastnosti kapaliny, zejména prodlouží životnost. Nanokapaliny nalézají aplikace v celé řadě průmyslových odvětví, jako je výkonová elektrotechnika, v mikroprocesorech, v mikroelektromechanických systémech a v biotechnologii. Často užívané nanoaditiva zahrnují kovy a oxidy kovů, např. jsou vytvořeny dotováním minerálního oleje TiO₂ nanočásticemi. Aditiva zlepšují oxidační stabilitu,

optimalizují absorpci plynů, zvyšují elektrickou pevnost, chrání proti katalytickým reakcím a snižují elektrostatické vybíjení. V současné době se používají např. 2,6-ditertiary-butyl paracesol a 2,6-ditertiary-butyl fenol.[10]

2 Elektroizolační kapaliny

V dnešní době jsou elektroizolační kapaliny nedílnou součástí mnoha elektrotechnických odvětví. Největší využití zaujímají v oblasti výkonových transformátorů, kde plní funkci izolačního a chladícího média. Využití elektroizolačních kapalin nespadá pouze pod výkonové transformátory. Používají se dále jako kapaliny pro kondenzátory a impregnaci kondenzátorů, pro kabelovou techniku, vypínače, jističe, jako chladící médium elektrických strojů a v průchodkách. Izolační systém, jehož součástí je elektroizolační kapalina, dále slouží k ochraně pevné izolace, k zhašení obloukových výbojů a dokonce ho lze použít jako akustické tlumící médium. Elektroizolační kapaliny bývají ve formě olejů. Díky nízké permitivitě kapalina odlehčuje při elektrickém namáhání pevné izolanty. Dále by měly vykazovat vysokou elektrickou pevnost a značný izolační odpor. Poslední zmíněné veličiny charakterizují dobrý izolant. U elektroizolačních kapalin je velmi důležitá vysoká časová stálost jednotlivých parametrů, které by se vlivem různých činitelů (teplota, elektrické namáhání, oxidace atd.) měli měnit minimálně. Elektroizolační kapaliny můžeme rozdělit do 3 skupin na minerální oleje, rostlinné oleje a syntetické oleje.[13][32]

2.1 Minerální oleje

Minerální oleje patří v současnosti mezi nepoužívanější kapalné izolanty v energetice. V elektrotechnických zařízeních se využívají jako izolační, chladící, impregnační a také i jako zhašecí médium. Disponují dobrými vlastnostmi, nízkou pořizovací cenou, nízkou hodnotou viskozity a dobrými degradačními vlastnostmi. Podle použití minerální oleje dělíme na oleje transformátorové, kondenzátorové a kabelové. Získávají se z lehkých olejů, z kondenzovaných při destilaci ropy. Při destilování ropy, se ropa dělí na jednotlivé složky podle bodu varu. Získaný olejový destilát je nutné rafinovat, abychom odstranily nežádoucí složky. Při rafinaci se tyto složky mění na nerozpustné látky, které se následně odstraní. Výsledné vlastnosti oleje jsou dány druhem a stupněm rafinačního procesu. Ostatní složky, které vznikají při destilaci, se dále využívají k výrobě dalších produktů (např. benzín). Z chemického hlediska jsou minerální oleje směsí uhlovodíků. Jelikož se ropa nachází na mnoha místech naší planety, zastoupení uhlovodíků se liší a je dáno druhem a jakostí ropy. Nevýhodou minerálních olejů je velmi špatná a pomalá odbouratelnost. Mají velmi negativní vliv na celkový ekosystém, včetně lidského zdraví. Do prostředí se olej může dostat mnoha způsoby včetně havárií, netěsnostmi, při likvidaci atd.[13][32]

Jak je uvedeno výše uvedeno, minerální oleje jsou směsí různých uhlovodíků obsažených v ropě. Tyto uhlovodíky dělíme na tři hlavní skupiny:

- a) skupina parafinická (metanová, alkanická) – obsahuje více než 66% nasycených parafinických uhlovodíků všeobecného vzorce C_nH_{2n+2} ,
- b) skupina naftenická (cyklická) – obsahuje více než 66% nasycených naftenických uhlovodíků řady C_nH_{2n} bez dvojných vazeb,
- c) skupina aromatická – obsahuje nenasycené uhlovodíky C_nH_{2n-6} se střídavě dvojnými vazbami mezi atomy uhlíku.

Nejvhodnější oleje pro elektroizolační využití se získávají z ropy, kde převládají nasycené uhlovodíky parafinické a naftenické při malém množství uhlovodíků aromatických. Skupina parafinická může mít normální parafinické uhlovodíky (uhlovodíky s molekulami s přímým řetězcem parafinického typu) nebo isoparafinické uhlovodíky (molekuly s větvenými alkany). Tento typ olejů má vyšší viskozitu a vyšší bod tuhnutí. Používají se k výrobě izolačních kapalin, technických mazadel, motorových olejů, k výrobě léků, mastí a balzámů. Skupina naftenická má oproti skupině parafinické nižší hodnotu viskozity a bodu tuhnutí, což má za následek lepší odvod a výměnu tepla. V oblasti elektrotechniky se využívají pro výrobu elektroizolačních transformátorových olejů a chladících olejů. Používají se i v kabelové technice. Skupina aromatická se používá k výrobě lepidel. Mají charakteristickou tmavou barvu a vyšší bod vzplanutí. Patří mezi polynukleární aromatické uhlovodíky, polycyklycké aromatické uhlovodíky nebo polyaromatické uhlovodíky. Aromatické uhlovodíky mají zásadní vliv na rozpustnost ve vodě a představují zdravotní riziko (oleje s koncentrací vyšší než 2% polyaromatických uhlovodíků jsou karcinogenní).

Výrobní proces minerálních olejů z ropy začíná odstraněním hrubých nečistot anorganických solí a vody. Následuje již zmíněná destilace ropy. Ropa se destiluje dvakrát, nejdříve atmosféricky, kde se odloučí benzinové, petrolejové a lehké olejové složky. Zbytky ropy (tzv. mazut) se dále destilují ve vakuové věži. Při této destilaci se získávají střední a těžké oleje. Následný zbytek po druhé destilaci obsahuje nejtěžší olejové destiláty, vazelínu a asfalt. Získaný lehký olej je třeba rafinovat, aby získal patřičné vlastnosti. Rafinací se olej zneutralizuje a je zbaven polárních kyslíkatých sloučenin. Tento proces může být proveden chemicky za použití kyseliny sírové nebo rozpouštědly. Kyselina sírová s nečistotami oleje vytvoří kal, který se odstraní odstředěním. Následuje další neutralizace a promývání. Selektivní rafinace rozpouštědly se rozpouští nežádoucí složky a následně se provede práškování, které probíhá při 130 °C a odstraňuje zbytky polárních látek a nečistot (je použita rozemletá bělicí hlinka).

V dnešní době nachází minerální oleje největší upotřebení v transformátorech. Transformátory používají velké množství oleje, které je dáno jeho výkonem a konstrukcí. Například transformátory s největšími výkony 400 MVA obsahují až 40000 litrů oleje, oproti tomu nejmenší transformátory využívající minerální oleje obsahují 75 litrů při výkonu 25 kVA. Během provozu transformátoru dochází působením teploty, elektrického pole, kyslíku, vody atd. k degradaci oleje. Pokud působením těchto vlivů dojde k poklesu parametrů oleje pod kritickou mez, hrozí havárie transformátoru. Řešení této situace má dvě možnosti, první je výměna oleje za nový, čímž ale musíme zlikvidovat olej původní, což je z ekologického hlediska obtížné. Z toho důvodu se provádí regenerace transformátorového oleje. Jedná se o znovuoobnovení všech parametrů použitého oleje na hodnoty stejné nebo podobné hodnotám nového oleje. Proces regenerace oleje se skládá z filtrace pevných částic, odplynění, vysoušení a inhibice oleje. Dále se při regeneraci čistí vynutí a transformátorová nádoba od kalů a jiných zbytků, které vznikají degradací oleje. Z ekologického hlediska je regenerace vhodná, protože vniká pouze minimum odpadních látek. [13][17][32]

2.2 Rostlinné oleje

Z environmentálních a bezpečnostních důvodů směřuje v současnosti výzkum k hledání alternativ za minerální oleje. Jednou z možností jsou rostlinné oleje. Získávají se lisováním semen olejnatých rostlin a olejnatého dřeva. Následnou rafinací se olej upraví tak, aby byl bez nečistot a nežádoucích složek. V poslední době se zkoumá využití rostlinných olejů ve výkonových transformátorech jako náhrada za minerální oleje. Mají dobrou odbouratelnost, jsou šetrné k životnímu prostředí, disponují dobrými elektrickými vlastnostmi, mazacími schopnostmi, obnovitelností a vysokým bodem vzplanutí, který se pohybuje nad 300 °C, což je téměř dvojnásobná hodnota oproti olejům minerálním. Nevýhodou rostlinných olejů je nízká odolnost vůči oxidaci a vůči nízkým teplotám. Ve vysokonapěťových aplikacích mohou být používány jen omezeně. Aby je bylo možné použít jako plnou náhradu za minerální oleje, je potřeba zařízení konstrukčně přizpůsobit a dimenzovat. V oblasti elektrotechniky jsou rostlinné oleje ve svém složení směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Z chemického hlediska jsou rostlinné oleje složeny z mastných kyselin a triacylglycerolu. Triacylglycerol je tvořen molekulou glycerolu v kombinaci s molekulami mastných kyselin na třech OH skupinách. Mastné kyseliny se dále dělí na nasycené mastné kyseliny (SAFA) a nenasycené mastné kyseliny. Zástupce nasycených mastných kyselin olejů je např. kyselina palmitová a kyselina stearová. Nenasycené mastné kyseliny se dále dělí na mononenasycené mastné kyseliny (MUFA), jejichž zástupce je např. kyselina olejová a na polynenasycené mastné kyseliny (PUFA), jejichž zástupce je např. kyselina linolová. Rostlinné oleje se dělí podle interakce s okolím na: [13][32]

- a) nevysychavé – do kterých patří olej ricinový, řepkový, olivový a slunečnicový (slunečnicový a řepkový olej se považují za polo-vysychavé)
- b) vysychavé – do kterých patří olej lněný, tungový, dřevný a makový.

2.2.1 Nevysychavé oleje

Zástupce nevysychavých olejů, olej ricinový je tekutým polárním izolantem. Má vysokou permitivitu ($\epsilon' = 4 - 5$), je odolný proti částečným výbojům a není jedovatý. Používá se k napouštění papírových kondenzátorů pro stejnosměrné obvody. Bylo zjištěno, že za použití aditiv, je schopen vykonávat funkci izolačního a chladicího média ve výkonových transformátorech. Bohužel se stále nevyrovnává parametrům minerálních olejů, kde zaostává ve ztrátovém činiteli a viskozitě.

2.2.2 Vysychavé oleje

Vysychavé oleje se chovají jako hmoty termoreaktivní (neboli tvrditelné). Za působení tepla a světla při stykem se vzduchem přecházejí do tuhého stavu. Používají se tudíž tenké vrstvy oleje, které při nanesení na povrch nějakého materiálu zasychají a vytváří pevnou lesklou tvrdou hmotu dobrých elektrických vlastností. Vysychání je chemický proces, při kterém se neodpařují části kapaliny, ale pohlcuje se kyslík. Celková hmotnost se tedy zvyšuje. Působením kyslíku dochází k oxidaci a polymeraci. Tato vlastnost oleje je dána přítomností mastných kyselin, které mají nenasycené vazby. Vysychání můžeme urychlit působením

tepla, světla a přítomností katalyzátorů (tzv. urychlovačů – chemických reagentů zrychlující vysušování). Film vzniklý z vysychavých olejů je stálý proti působení rozpouštědel, i proti transformátorovému oleji. Vyniká odolností v teplém stavu proti těžším uhlovodíkům. Jak bylo zmíněno, vysychavé oleje považujeme za tvrditelné, protože působením tepla se film vysušeného oleje nezměkčí. Nejvýznamnější zástupci vysychavých olejů jsou olej lněný a olej dřevný. Dřevný olej se získává ze semen tungového stromu a v porovnání s olejem lněným je výhodnější. Výhody jsou rychlejší schnutí a má větší odolnost proti vnikání vody. Vysychavé oleje se v elektrotechnice používají hlavně jako laky zvyšující elektroizolační, mechanické i tepelné vlastnosti základního materiálu. Nevýhodou dřevného oleje je tepelné stárnutí, při kterém olej křehne a odlupuje se od povrchu materiálu, na který byl nanesen. [13][17]

2.3 Syntetické oleje

Další alternativou jsou syntetické oleje. Vyznačují se nehořlavostí, lépe odolávají stárnutí a mají dobré elektrické vlastnosti. Jsou stejně jako rostlinné oleje snadno odbouratelné a nezatěžují až na výjimky životní prostředí. Syntetické oleje byly vyvíjeny jako náhrada za minerální oleje, ale díky vysoké ceně se používají pouze ve zvláštních případech, kde je vyžadována zvýšená bezpečnost. Používají se i jako impregnace papírových izolací a ve směsi s minerálními oleji. Při vytváření směsi ze syntetických a minerálních olejů musí být zaručena mísitelnost obou složek v jakémkoli poměru. [13]

Syntetické oleje se dělí podle složení do následujících skupin:

- a) kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků,
- b) chlorované uhlovodíky,
- c) fluorované tekutiny,
- d) organické estery,
- e) silikonové polymery.

2.3.1 Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků

Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků mají různou hodnotu viskozity. Vnikají při polymeraci nenasycených uhlovodíků butylénu i propylénu. Hlavním zástupcem jsou polybutylény. Vyznačují se dobrými elektrickými vlastnostmi, nízkými dielektrickými ztrátami, stabilitou při vyšších teplotách, velkým měrným odporem, velkou elektrickou pevností (až $180 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$) a odolností proti oxidaci a záření. Používají se jako impregnace svítkových kondenzátorů a náplně kabelů.

2.3.2 Chlorované uhlovodíky

Chlorované uhlovodíky mají dva hlavní představitele a to chlorované deriváty benzenu a bifenyly. Elektroizolační vlastnosti jsou určeny použitým stupněm chlоровání. Chlorované uhlovodíky se v minulosti značně rozšířily a výroba dosahovala milionů tun sloučenin na bázi chlorovaných uhlovodíků. V době svého objevu byly tyto sloučeniny považovány za neškodné a až po hromadném dlouholetém užívání se zjistilo, že mají katastrofální dopad na životní prostředí. Z důvodu velké ekologické zátěže životního prostředí se v dnešní době kapaliny na bázi chlorovaných uhlovodíků nevyrábí a stahují se z oběhu. Setkat se s nimi ale

můžeme stále ve starších zařízeních a produktech. Proto zde bude charakterizováno pár zástupců. Pro kondenzátory se nejvíce používal pentachlordifenyl ($C_6H_2Cl_3-C_6H_3Cl_2$). Jedná se o polární dielektrikum s permitivitou 4,5 – 5 a používal se na napouštění kondenzátorových papírů. Má vysokou viskozitu, která je téměř dvojnásobná při teplotě 50 °C oproti minerálnímu oleji. Čistý pentachlordifenyl se pro plnění transformátorů nepoužívá. Pro použití jako elektroizolační kapaliny pro výkonové transformátory se míchal s trichlorbenzenem.

2.3.3 Fluorované sloučeniny

Fluorované sloučeniny disponují výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Jsou chemicky stálé do teplot kolem 500 °C. Ve vlhkém prostředí klesá izolační odpor a elektrická pevnost, oproti minerálním olejům je tento pokles značně menší. Dále působením vlhkosti působí korozivně na železo, hliník i měď. Při elektrickém průrazu vznikají kyseliny obsahující chlór, které agresivně napadají hmoty i kovy. Pokud jsou suché, nenapadají kovy ani izolanty. Nevýhodou je vysoká toxicita fluoru. Využívá se jejich zhášecích účinků v transformátorech a spínacích prvcích.

2.3.4 Organické estery

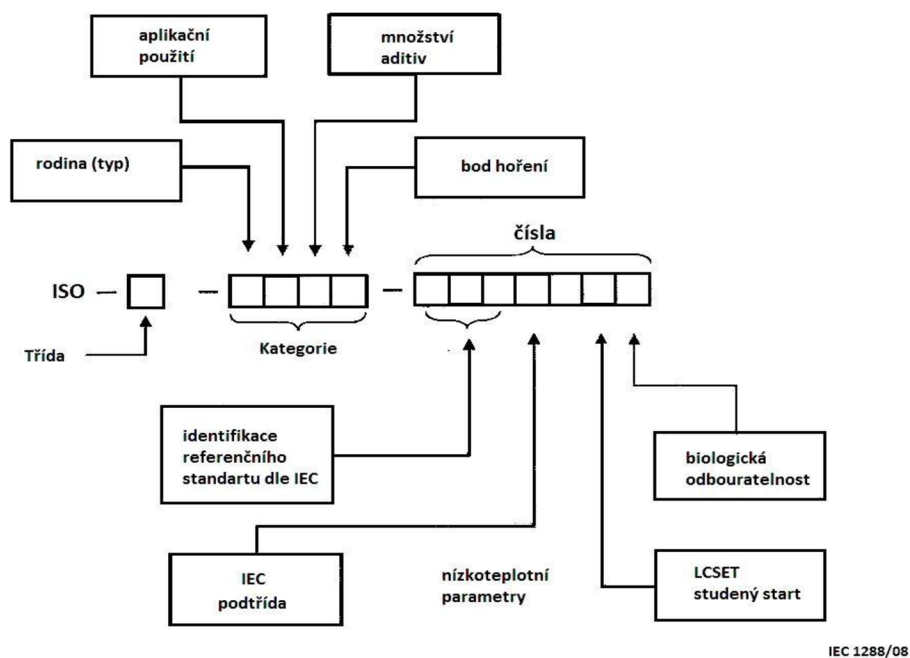
Organické estery se používají jen takové, které jsou možné použít jako elektroizolační kapaliny. Jsou vyráběny chemickou syntézou s uzavřenou strukturou, aby odstranili centra nestability v oblastech, kde minerální oleje nevyhovují. Vyznačují se vysokým bodem hoření a vzplanutí a vyšší viskozitou. V současnosti se používá metylester kyseliny řepkového oleje. Lze ho upravit jako izolant pro napěťovou hladinu nízkého napětí. Další zástupce je etylester řepkového oleje a jeho směs s ropnými uhlovodíky, které má podobné vlastnosti. Využívají se k plnění transformátorů a vysokofrekvenčních kondenzátorů kde se používá dibutylsebacínát. Zde je nevýhoda ve vyšší viskozitě, kdy dochází k horšímu přenosu tepla a jsou zde vyšší požadavky na oběhová čerpadla.

2.3.5 Silikonové polymery

Silikonové polymery mají velmi dobrou stálost v širokém rozmezí teplot. Jsou ekologicky nezávadné, nehořlavé, disponují dobrými elektroizolačními vlastnostmi, mají nízký bod tuhnutí a nepodléhají oxidaci a jiným chemickým procesům. Silikonové polymery jsou chemickým složením polymetyl nebo etylsiloxany, jejichž jednotlivé druhy se liší viskozitou. Nemohou se používat na zhašení vzniklých oblouků v elektrických vypínačích, protože při vzniku oblouku se z nich jen zvolna vyvíjejí plyny. [13][17][32]

2.4 Klasifikace a požadavky kladené na oleje dle norem

Rozdělení kapalin dle normy ČSN EN 61039 se zavádí pro jednotné značení olejů v Evropě. Tato norma usnadňuje komunikaci mezi výrobcem a zákazníkem a zaručuje kompatibilitu značení. Norma určuje předpis jak výrobek označit z hlediska vlastností, provedení, způsobu používání atd. Slouží tedy spotřebiteli jako informační prvek k nákupu výrobku s přesnými parametry. Norma ČSN EN 61039 z června roku 2009 se zabývá podrobnou klasifikací izolačních kapalin. V souladu s normou ISO 8681 je izolační kapalina definována značením: ISO – třída – kategorie – případné doplňkové číslo. [5]



Obr. 1: Klasifikace izolačních kapalin dle normy ČSN EN 61039 [29]

Značení se provádí dle schématu na Obr. 1. Třída se volí podle pěti písmen F, S, L, W, B. Jedná se o klasifikační třídu ropných a alternativních produktů, kde každé písmeno zastupuje druh produktu dle Tab. 2. Izolační kapaliny spadají do třídy L.

Tab. 2: Třídy ropných a alternativních produktů [5]

Třída	Produkt
F	Paliva
S	Rozpouštědla a suroviny pro chemický průmysl
L	Maziva, průmyslové oleje a související produkty
W	Vosky
B	Bitumeny

Kategorie se značí pomocí čtyř znaků, z nichž každý zastupuje písmeno. První znak bude vždy N, protože označuje skupinu elektroizolačních kapalin. Na druhém místě se vyskytují písmena C, T, S a Y. Označuje kapaliny dle použití, kdy písmeno C označuje kapaliny pro kondenzátory, písmeno T kapaliny pro transformátory a spínací prvky, písmeno S kapaliny pro spínací prvky s pracovní teplotou menší než $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a písmeno Y kapaliny pro kabely. Třetí znak označuje přítomnost antioxidantů. Kdy písmeno U označuje

kapaliny bez aditiv, písmeno T jsou kapaliny s aditivy v množství menším než 0,08 % hmotnosti oleje a písmeno I jsou aditiva v množství větším než 0,08 % hmotnosti. Poslední čtvrtý znak určuje bod hoření a značí se pod písmeny O, K a L. Písmeno O označuje kapaliny s bodem hoření menším než 300 °C, písmeno K jsou kapaliny s bodem hoření větším než 300 °C a písmeno L značí kapaliny, u kterých není bod vzplanuté identifikován. Identifikační číslo, které se vyskytuje za kategorií, nemusí být uvedeno. Skládá ze sedmi číslic, z nichž první tři číslice identifikují referenční standard. Pokud tento standard chybí, uvádí se na jeho místě 000. Čtvrté číslo identifikuje podtřídou, pokud chybí, uvádí se rovněž 0. Páté číslo označuje výhřevnost kapaliny, číslem 1 kapaliny s výhřevností větší nebo rovno 42 MJ/kg, číslem 2 pro kapaliny s výhřevností menší než 42 MJ/kg a číslem 3 pro kapaliny s výhřevností menší než 32 MJ/kg. Šesté číslo označuje nejnižší pracovní teplotu při cirkulaci kapaliny, číslem 0 kapaliny s nedefinovaným studeným startem (označován LCSET z anglického „Lowest cold start energizing temperature“), číslem 1 je LCSET větší nebo roven 0 °C, číslem 2 je LCSET větší nebo roven -10 °C, číslem 3 je LCSET větší nebo roven -30 °C a číslem 4 je LCSET větší nebo roven -40 °C. Poslední sedmé číslo značí biologickou rozložitelnost dané kapaliny metodami C nebo F, kdy číslo 0 jsou kapaliny biologicky nerozložitelné (rozložitelnost menší než 20 %), číslo 1 jsou kapaliny s mírnou biologickou rozložitelností (rozložitelnost mezi 20 – 40 %), číslo 2 jsou kapaliny s dobrou biologickou rozložitelností (rozložitelnost mezi 40 – 70 %) a číslo 3 jsou kapaliny plně rozložitelné (rozložitelnost větší než 70 %). [5][29]

Požadavky kladené na elektroizolační oleje stanovuje norma ČSN 60422, která se týká minerálních olejů. I přesto že se diplomová práce zabývá alternativními kapalinami, jako jsou organické oleje, budou tyto požadavky použity pro vyhodnocení výsledků. Minerální oleje disponují lepšími elektroizolačními vlastnostmi a budou tak sloužit jako referenční hodnota k rostlinným olejům. Norma ČSN 60422 slouží k zabezpečení spolehlivosti chodu elektrických zařízení plněných olejem prostřednictvím monitorování a udržování jakosti olejů. Norma rozděluje zařízení do kategorií O, A, B, B, D, E, F a G. Do kategorie O (Tab. 3) spadají výkonové transformátory a reaktory o jmenovitém napětí 400 kV a výše. Do kategorie A (Tab. 4) patří výkonové transformátory a reaktory o jmenovitém napětí nad 170 kV a do 400 kV, také transformátory jakéhokoli napětí, kde je velmi důležité nepřetržité napájení (odbočkové) a podobná zařízení pro speciální aplikace pracující v obtížných podmínkách. Do kategorie B (Tab. 5) patří výkonové transformátory a reaktory o jmenovitém napětí nad 72,5 kV až do 170 kV. Do kategorie C (Tab. 6) patří výkonové transformátory a reaktory pro VN/NN aplikace (např. o jmenovitém napětí do 72,5 kV, trakční transformátory, olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí nad 72,5 kV, olejem plněná spínací zařízení, kovově zapouzdřená rozvodná zařízení pro střídavý proud o jmenovitém napětí větším nebo rovným 16 kV). Do kategorie D (Tab. 7) patří přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí nad 170 kV. Do kategorie E (Tab. 8) patří přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí až do 170 kV. Do kategorie F (Tab. 9) patří nádoby přepínačů odboček pod zatížením zahrnující kombinované nádoby pro volič a přepínač a do kategorie G (Tab. 10) patří olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí do 72,5 kV, olejem plněná spínací zařízení, kovově zapouzdřená rozvodná zařízení pro střídavý proud o jmenovitém napětí menším než 16 kV. Díky působením vnějších vlivů dochází

k degradaci olejů, proto norma stanovuje rutinní zkoušky jakosti, které se provádí v předem stanovených intervalech určených pro každou kategorii. Kategorie O a D provádí rutinní zkoušky každé 1 – 2 roky, kategorie A každé 1 – 3 roky, kategorie B každé 1 – 4 roky a kategorie C, E, F, G každých 2 – 6 let. V tabulkách níže dle normy ČSN 60422 je uveden výčet parametrů pro každou danou kategorii.

Tab. 3: Kategorie zařízení O – Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí 400 kV a výše. Převzato z [4].

Parametr	Nový olej	Olej v provozu		
		Dobrý	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	> 60	> 60	50 - 60	< 50
Obsah vody (mg/kg)	< 10	< 5	5 - 10	> 10
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	< 0,10	0,10 – 0,15	> 0,15
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,010	< 0,10	0,10 – 0,20	> 0,20
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	> 200	20 - 200	< 20
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	> 10	1 - 10	< 1
Oxidační stabilita	Podle normy IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	> 28	22 - 28	< 22
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

Tab. 4: Kategorie zařízení A – Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí nad 170 kV a do 400 kV. Převzato z [4].

Parametr	Nový olej	Olej v provozu		
		Dobrý	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	> 55	> 60	50 - 60	< 50
Obsah vody (mg/kg)	< 10	< 5	5 - 10	> 10
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	< 0,10	0,10 – 0,15	> 0,15
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,010	< 0,10	0,10 – 0,20	> 0,20
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	> 200	20 - 200	< 20
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	> 10	1 - 10	< 1
Oxidační stabilita	Podle normy IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	> 28	22 - 28	< 22
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

Tab. 5: Kategorie zařízení B - Výkonové transformátory/reaktory o jmenovitém napětí nad 72,5 kV až do 170 kV včetně. Převzato z [4].

Parametr	Nový olej	Olej v provozu		
		Dobry	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	> 60	> 50	40 - 50	< 40
Obsah vody (mg/kg)	< 10	< 5	5 - 15	> 15
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	< 0,10	0,10 – 0,20	> 0,20
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,015	< 0,10	0,10 – 0,50	> 0,50
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	> 60	4 - 60	< 4
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	> 3	0,2 - 3	< 0,2
Oxidační stabilita	Podle normy IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	> 28	22 - 28	< 22
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

Tab. 6: Kategorie zařízení C – Výkonové transformátory/reaktory pro VN/NN aplikace. Převzato z [4].

Parametr	Nový olej	Olej v provozu		
		Dobry	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	do 72,5kV > 55 nad 72,5kV > 60	> 40	30 - 40	< 30
Obsah vody (mg/kg)	20	< 10	10 - 25	> 25
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	< 0,15	0,15 – 0,30	> 0,30
Ztrátový činitel při 90 °C	do 72,5kV ≤ 0,015 nad 72,5kV ≤ 0,010	< 0,10	0,10 – 0,50	> 0,50
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	> 60	4 - 60	< 4
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	> 3	0,2 - 3	< 0,2
Oxidační stabilita	Podle normy IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	> 28	22 - 28	< 22
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

Tab. 7: Kategorie zařízení D – Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí nad 170 kV. Převzato z [4].

Parametr	Nový olej	Olej v provozu		
		Dobry	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	> 60	> 60	50 - 60	< 50
Obsah vody (mg/kg)	< 10	< 5	5 - 10	> 10
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	< 0,10	0,10 – 0,15	> 0,15
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,010	< 0,01	0,01 – 0,03	> 0,03
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	> 800	250 - 800	< 250
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	> 50	10 - 50	< 10
Oxidační stabilita	Podle normy IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	> 28	22 - 28	< 22
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

Tab. 8: Kategorie zařízení E – Přístrojové transformátory pro měření a ochrany o jmenovitém napětí až do 170 kV včetně. Převzato z [4].

Parametr	Nový	V provozu		
		Dobry	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	> 60	> 50	40 - 50	< 40
Obsah vody (mg/kg)	< 10	< 5	5 - 15	> 15
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	< 0,10	0,10 – 0,20	> 0,20
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,015	< 0,10	0,10 – 0,30	> 0,30
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	> 60	7 - 60	< 7
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	> 3	0,4 - 3	< 0,4
Oxidační stabilita	Podle normy IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	Není rutinní zkouška		
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

Tab. 9: Kategorie zařízení F – Nádoby přepínačů odboček pod zatížením zahrnující kombinované nádoby pro volič a přepínač. Převzato z [4].

Parametr	Olej v provozu		
	Dobří	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (Norma ISO 2049)			
Průrazné napětí (kV)	Přepínače odboček zapojený do hvězdy (regulující v neutrálu transformátoru) u O,A,B,C transformátorů < 25. Jednofázové nebo propojené přepínače odboček u O,A,B transformátorů < 40.		
Obsah vody (mg/kg)	Jako pro odpovídající transformátor		
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Není rutinní zkouška		
Ztrátový činitel při 90 °C	Není rutinní zkouška		
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	-	-
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	-	-	-
Oxidační stabilita	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Neaplikuje se.		
Celkový obsah PCB (mg/kg)	< 50	< 50	< 50
Částice	viz. tab	viz. tab	viz. tab

Tab. 10: Kategorie zařízení G - Olejem plněné vypínače o jmenovitém napětí do 72,5 kV včetně. Převzato z [4].

Parametr	Nový	V provozu		
		Dobří	Vyhovující	Špatný
Vzhled	Čirý	Čirý		Tmavý a/nebo kalný
Barva (ISO 2049)	Max. 2,0			
Průrazné napětí (kV)	> 55	-	-	< 30
Obsah vody (mg/kg)	20	Není rutinní zkouška		
Číslo kyselosti (mg KOH/g)	Max. 0,03	Není rutinní zkouška		
Ztrátový činitel při 90 °C	Max. 0,015	Není rutinní zkouška		
Rezistivita při 20 °C (GΩm)	-	-	-	-
Rezistivita při 90 °C (GΩm)	Min. 60	-	-	-
Oxidační stabilita	Jak je uvedeno v IEC 60296	-	-	-
Mezipovrchové napětí (mN/m)	Min. 35	Neaplikuje se		
Celkový obsah PCB (mg/kg)	Nedetekovatelné (<2)	< 50	< 50	< 50

3 Vlastnosti elektroizolačních kapalin

Pro stanovení požadavků, které se kladou na elektroizolační kapaliny, je třeba si definovat jejich vlastnosti. Pro každou aplikaci, jsou vhodné jiné vlastnosti, proto je třeba si definovat elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti, které slouží pro určení hlavních požadavků. Všeobecně pro použití elektroizolačních kapalin jako izolačního a chladícího média je vhodné použít kapalinu s nízkou viskozitou. Taková kapalina zaručí dobré vyplnění prostoru včetně vyplnění porů tuhých izolantů. Kromě dobrého přenosu a odvodu tepla, který zaručí spolehlivý provoz transformátoru, musí vykazovat dobrou tepelnou stabilitu ostatních parametrů. Kapaliny, které se používají jako náplně do kondenzátorů, musí disponovat velkou vnitřní rezistivitou, malým rozptylem hodnot ztrátového činitele vlivem teploty, dobrou oxidační stabilitou a větší schopností pohlcovat plyny. U kabelů klasické konstrukce do 70 kV se elektroizolační kapaliny uplatňují jako impregnace papírové izolace. Zde je důležitá teplotní závislost viskozity, při plnění by měla být nízká a při provozu vysoká. Zmíněné požadavky je jen výčet z mnoha dalších. Elektroizolační kapaliny a jejich jednotlivé jakostní parametry by měly splňovat přípustné hodnoty, které jsou předepsané normami. Tyto jakostní parametry jsou požadované vlastnosti, které charakterizují elektroizolační kapalinu. V kapitolách níže jsou popsány elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti elektroizolačních kapalin. [18]

3.1 Elektrické vlastnosti

3.1.1 Polarizace dielektrika

Dielektrika se podle jejich vnitřní struktury dělí na polární a nepolární. Polárnost nebo nepolárnost látek souvisí s typem vazby mezi atomy, prostorovým uspořádáním a celkovou složitostí. Obecně polární látka obsahuje ve svém objemu bez působení vnějšího elektrického pole permanentní elementární dipólové momenty. Nositeli těchto dipólových momentů jsou molekuly, ve kterých se neshodují těžiště kladných a záporných nábojů. Polárnost má veliký vliv na chování dielektrik v elektrickém poli. Polárnost také ovlivňuje děje probíhající v dielektriku po vložení do elektrického pole – tzv. polarizační procesy. Na polarizaci lze pohlížet z makroskopického a mikroskopického hlediska. Makroskopické hledisko nahlíží na polarizaci jako na vznik dipólových momentů dielektrika jako celku, proto zkoumá vnější projevy polarizačních dějů. Mikroskopické hledisko popisuje polarizaci jako pružné posunutí nosičů vázaného náboje ve stejném směru jako přiložené elektrické pole v rámci mikroskopických rozměrů. Sleduje natažení dipólových momentů ve struktuře dané látky do směru působícího elektrického pole. Schopnost polarizace látky vyjadřuje polarizovatelnost α , jedná se o základní fyzikální vlastnost dielektrik. Vztah indukovaného dipólového momentu látky a polarizovatelnosti je

$$\vec{\mu}_i = \alpha \cdot \vec{E}_{lok} \quad (1)$$

kde μ_i je indukovaný dipólový moment a \vec{E}_{lok} je intenzita vnitřního lokálního elektrického pole. Mírou polarizace v dielektriku je vektor polarizace \vec{P} a relativní permitivita ϵ' . Vektor polarizace je určen vztahem

$$\vec{P} = n \cdot \vec{\mu}_i = n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_{lok} \quad (2)$$

kde n je koncentrace polarizovatelných částic. Vektor polarizace je součet jednotlivých indukovaných dipólových momentů v jednotkovém objemu. Matematicky platí

$$\vec{P} = \frac{\sum \mu_i}{V} \quad (3)$$

Další veličinou popisující elektrické jevy v dielektriku je elektrická indukce \vec{D} pro níž platí

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (4)$$

kde \vec{E} je vektor intenzity působícího vnějšího elektrického pole a ϵ_0 je permitivita vakua.

Polarizace v dielektriku se dělí na více mechanismů. Hlavní mechanismy se dělí na pružné, relaxační a zvláštní polarizace. V dielektriku probíhá současně vícero druhů polarizací a platí, že slabší typy polarizací bývají překryty silnějšími typy polarizací. Do pružných polarizací patří polarizace elektronová a iontová.

Pružné polarizace probíhají téměř okamžitě, mají extrémně krátkou dobu trvání a celý mechanismus probíhá pružně a bez ztrát. Nejsou frekvenčně závislé. Elektronová polarizace se vyskytuje u všech dielektrik, probíhá bez ztrát a nezávisí na teplotě. Princip spočívá v působení vnějšího elektrického pole na dielektrikum, které díky Coulombovských sil způsobí posunutí elektronů vůči jádru. Rychlost ustálení se pohybuje v rozmezí $10^{-16} - 10^{-13}$ s. Iontová polarizace se vyskytuje u iontových krystalů. Je to bezeztrátová polarizace, je závislá na teplotě, nezávislá na frekvenci přiloženého elektrického pole a její doba ustálení je $10^{-13} - 10^{-12}$ s. Hlavní rozdíl mezi iontovou a elektronovou polarizací je existence permanentních dipólových momentů i bez působení vnějšího elektrického pole (dáno strukturou dielektrika).

Relaxační polarizace se výrazně liší od pružné, a to díky doby průběhu tak i formou. Relaxační polarizace probíhají pozvolna a po přiložení elektrického pole působící na dielektrikum přibývá polarizace pomalu a naopak po odpojení pole polarizace postupně ubývá. Časový průběh těchto časů potřebných k ustálení má exponenciální průběh a je charakterizován tzv. relaxační dobou τ . Tento druh polarizací je velmi závislý na teplotě a vždy je doprovázen ztrátami (které způsobují další zahřívání dielektrika). Do relaxačních polarizací spadají polarizace dipólová a iontová-relaxační. Polarizace dipólová se objevuje u polárních látek. Při dipólové polarizaci vznikají ztráty v dielektriku, dále je polarizace silně závislá na teplotě i frekvenci přiloženého elektrického pole. Doba ustálení se u nízkomolekulárních látek pohybuje mezi $10^{-12} - 10^{-8}$ s, u makromolekulárních látek je tato

doba o mnoho řádů vyšší. Druhá iontová-relaxační polarizace se objevuje v iontových látkách s netěsným uložením iontů jako je keramika nebo anorganická skla. Stejně jako u dipólové polarizace je doprovázena ztrátami energie a je závislá na teplotě i na frekvenci přiloženého pole. Matematický popis tohoto typu polarizace využívá tzv. model dvojité potenciálové jámy. Doba ustálení se pohybuje v rozmezí $10^{-12} - 10^{-8}$ s.

Posledním typem polarizačních mechanismů jsou polarizace zvláštní. Patří sem polarizace migrační, spontánní, permanentní a rezonanční. Polarizace migrační je typ polarizace, u které se kromě vázaných nosičů náboje účastní i volné nosiče elektrického náboje. Výskyt tohoto typu polarizace je podmíněn makroskopickými nehomogenitami v látkách. Jsou to např. látky s částicovými nebo vláknitými plnivými, lamináty, pórové a pěnové materiály, znečištěné látky nebo látky s různými strukturálními defekty. Kromě zmíněných nehomogenit je podmínkou pro vznik migrační polarizace také přítomnost již zmíněných volných nosičů elektrického náboje. Nejvýrazněji se tento typ polarizace projevuje u vysokonapěťových zařízení pracujících buď se stejnosměrným napětím, nebo v oblasti nízkých frekvencí. Je teplotně závislý a doprovází ho ztráty. Další typ je polarizace spontánní, který se objevuje ve feroelektrických látkách vyznačujících se doménovou strukturou shora omezenou Curieho teplotou T_C . Domény jsou v podstatě makroskopické oblasti, ve kterých jsou všechny částice plně spontánně polarizovány v důsledku působení vnitřních výměnných sil. I tento typ je doprovázen ztrátami, je závislý na kmitočtu, intenzitě přiloženého elektrického pole a také na teplotě. Další typ ze zvláštních polarizací je permanentní polarizace. Objevuje se u některých polárních látek s malou elektrickou vodivostí. V případě permanentní polarizace si látka drží přídavný dipólový moment, který vznikne následkem orientace dipólových molekul a vytvoření prostorových nábojů. Poslední typ je polarizace rezonanční, která se vyskytuje u všech dielektrik. Vzniká v důsledku rezonance vlastních kmitů částic s elektrickým nábojem s kmitu vnějšího elektrického pole.[19][14]

3.1.2 Dielektrikum v elektrostatickém poli

Pro popis chování dielektrika v elektrostatickém poli je třeba si zavést veličinu, která charakterizuje dielektrikum. Jedná se o relativní permitivitu. Charakterizuje vliv prostředí na intenzitu elektrického pole, tedy namáhání izolace (dielektrika) nacházející se v tomto elektrickém poli. Můžeme ji také definovat jako poměr kapacity C kondenzátoru vyplněného dielektrikem a geometrické kapacity C_0 identického vakuového kondenzátoru. Zapsáno vztahem (5):

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (5)$$

U elektroizolačních olejů se pohybuje kolem 2 – 3. Je úměrná polarizaci, s rostoucí teplotou klesá a při degradaci olejů roste. Je to tedy další parametr, kterým se může posuzovat jakost oleje.[19]

V případě elektrostatického pole se používá tzv. statická relativní permitivita. Na základě mikroskopických veličin lze vyjádřit vektor polarizace dielektrika v elektrostatickém poli podle vztahu (2). Z makroskopického pohledu lze vektor polarizace vyjádřit

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot (\varepsilon_s - 1) \quad (6)$$

Spojením vztahů z mikroskopického (2) a makroskopického (6) hlediska se dostává Clausiova rovnice

$$\vec{P} = n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_{lok} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot (\varepsilon_s - 1) \quad (7)$$

Dosazení za lokální vnitřní pole dielektrika se dostává rovnice

$$n \cdot \alpha \cdot \frac{\varepsilon_s + 2}{3} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot (\varepsilon_s - 1) \quad (8)$$

Po úpravě rovnice (8) se dostává tzv. Clausiovu-Mossottiho rovnice, která zavádí tzv. měrnou polarizaci P_m , která se využívá pro vyloučení závislosti polarizace na počtu částic v objemové jednotce. Tvar rovnice je

$$\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 2} = \frac{n \cdot \alpha}{3 \cdot \varepsilon_0} = P_m \quad (9)$$

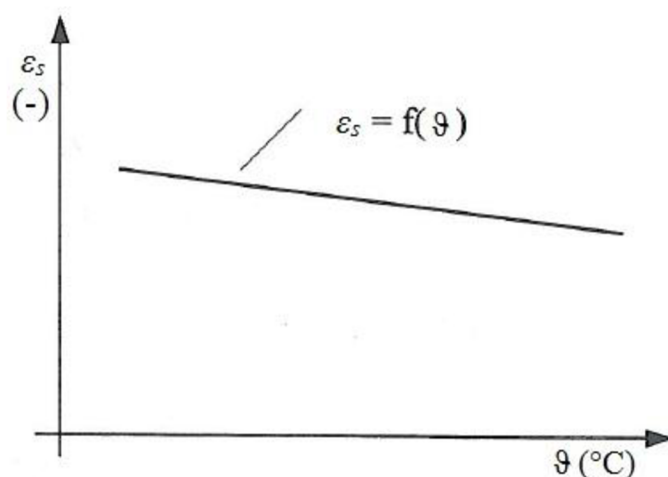
vyjádření koncentrace částic n pomocí hustoty ρ , molární hmotnosti M a Avogadrovy konstanty N_A , je dáno vztahem

$$n = \frac{\rho \cdot N_A}{M} \quad (10)$$

a následným dosazením do rovnice (9) se rovnice upraví do tvaru

$$\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \cdot \alpha}{3 \cdot \varepsilon_0} = P_m \quad (11)$$

Pro rovnice (9) a (11) platí izotropní dielektrika, jako jsou nepolární kapaliny, plynná dielektrika v nepříliš vysokém tlaku a pevná nepolární symetrická dielektrika. Dále je třeba dbát na vliv vnějších činitelů jako je teplota nebo frekvence, které relativní statickou permitivitu ovlivňují. Závislost teploty u nepolárních dielektrik je dána změnou hustoty látek, která zapříčiní změnu koncentrace polarizovaných částic. Závislost statické permitivity je na Obr. 2.



Obr. 2: Závislost statické permitivity na teplotě pro nepolární dielektrické kapaliny [19]

U polárních kapalných dielektrik je situace složitější, protože lokální vnitřní pole nejde jednoduše vyjádřit jako v rovnici (8). Fyzikou kapalných dielektrik se zabíralo více autorů, níže je pár uvedených příkladů úprav Clausiovu-Mossottiho rovnice (9). Peter Debye upravil rovnici do tvaru

$$\frac{\varepsilon_s - 1}{\varepsilon_s + 2} = \frac{n}{3 \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\alpha_e + R(b) \cdot \frac{\overline{\mu_0^2}}{3 \cdot k \cdot T} \right) \quad (12)$$

kde (9) $R(b)$ je redukční faktor, μ_0 je dipólový moment molekuly. Bohužel se jedná o empirický vztah, protože redukční faktor se dá určit pouze experimentálně. Lars Onsager upravil rovnici do tvaru

$$\frac{(\varepsilon_s - n_D^2) \cdot (2 \cdot \varepsilon_s - n_D^2)}{\varepsilon_s \cdot (n_D^2 + 2)^2} = \frac{n}{3 \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{\mu_0^2}{3 \cdot k \cdot T} \quad (13)$$

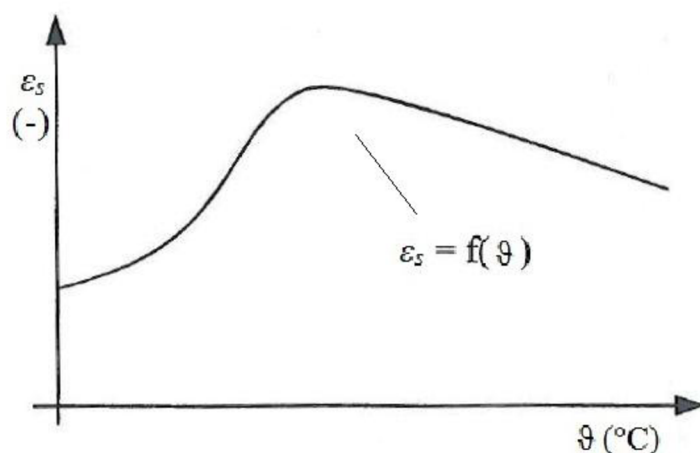
n zde představuje koncentraci dipólových molekul a n_D index lomu kapaliny. Tuto rovnici lze používat jen pro slabě polární kapalná dielektrika. Onsager v rovnici zanedbal síly působící na krátké vzdálenosti. Tuto nedokonalost se snažil odstranit John G. Kirkwood, který zavedl tzv. redukční faktor g . Rovnice potom měla tvar

$$\frac{(\varepsilon_s - n_D^2) \cdot (2 \cdot \varepsilon_s - n_D^2)}{\varepsilon_s \cdot (n_D^2 + 2)^2} = \frac{n}{3 \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{\mu_0^2}{3 \cdot k \cdot T} \cdot g \quad (14)$$

kde redukční faktor g je roven

$$g = 1 + z \cdot \overline{\cos \gamma} \quad (15)$$

kde z je střední počet nejbližších sousedních dipólů a $\overline{\cos \vartheta}$ je střední hodnota kosinu úhlu mezi sousedními dipóly. Závislost statické permitivity v celém rozsahu teplot je zobrazena na Obr. 3.[14][19]



Obr. 3: Závislost statické permitivity na teplotě pro polární dielektrické kapaliny [19]

3.1.3 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Jevy probíhající v dielektriku vystavenému střídavému elektrickému poli jsou složitější, než je tomu při působení statického elektrického pole. Komplikovanost těchto jevů je dána kinetickými vlastnostmi částic. Kvůli setrvačnosti částic se fázově zpožďuje vektor elektrické indukce $\vec{D}(t)$ za vektorem intenzity elektrického pole $\vec{E}(t)$ o určitý úhel δ . Vztah mezi těmito vektory ve frekvenční závislosti je dán vztahem

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \epsilon_0 \cdot \epsilon^*(j\omega) \cdot \vec{E}_m \quad (16)$$

kde \vec{D}_m a \vec{E}_m jsou amplitudy daných vektorů. Výsledný vztah (16) vykazuje jistou podobnost se vztahem pro stejnosměrné elektrické pole pro elektrickou indukci $D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E$.

Činitelem úměrnosti mezi vektory $\vec{D}(t)$ a $\vec{E}(t)$ je komplexní permitivita $\epsilon^*(j\omega)$. Je to frekvenčně závislá veličina pro kterou platí vztah

$$\epsilon^*(j\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (17)$$

kde $\epsilon'(\omega)$ je reálná část komplexní permitivity, jde o vlastní relativní permitivitu a má stejný význam jako relativní permitivita v elektrostatickém poli. Imaginární část $\epsilon''(\omega)$ je mírou vzniklých ztrát v dielektriku vlivem namáhání střídavého elektrického pole. V případě nepolárních dielektrik se pomalé relaxační polarizace nevyskytují, tudíž komplexní permitivita nemá imaginární část. Reálná část u nepolárních dielektrik není frekvenčně závislá. U polárních dielektrik dochází k určitému zpoždění polarizačních dějů. Tento jev se nazývá dielektrická relaxace. Pro slabě polární kapalná dielektrika odvodil Debye vztah

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega \cdot \tau} \quad (18)$$

jde o tzv. Debyeovu rovnici, kde ε_s je statická relativní permitivita, která představuje hodnotu relativní permitivity při frekvencích blízkých se 0 (tedy $f \rightarrow 0$), ε_∞ je optická relativní permitivita, která představuje hodnotu relativní permitivity při frekvencích blízkých se ∞ (tedy $f \rightarrow \infty$). Debyeova rovnice platí pouze pro jeden polarizační mechanismus s jednou zcela konkrétní relaxační dobou τ . Rozložením rovnice se získají výrazy pro reálnou a imaginární část komplexní permitivity

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (19)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (20)$$

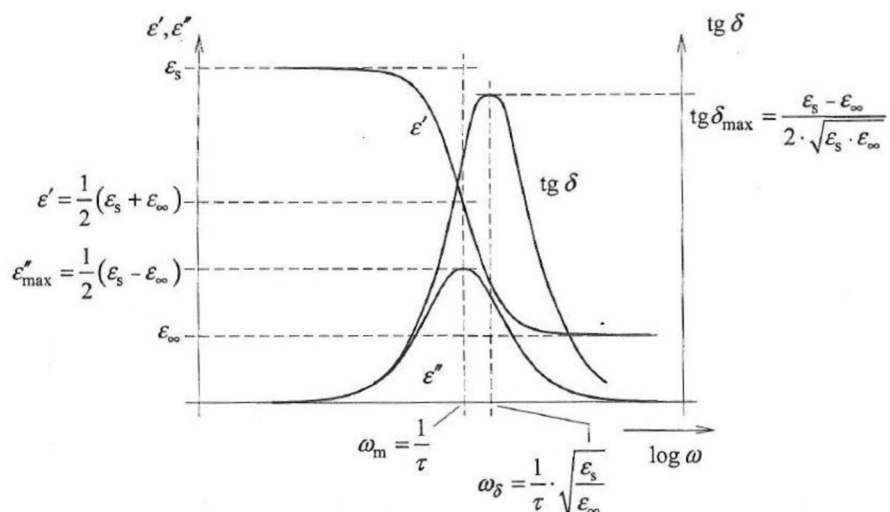
Poměr reálné a imaginární části komplexní permitivity lze vyjádřit jako ztrátový činitel $tg\delta$. Platí vztah

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (21)$$

kde za ε' a ε'' se dosadí vztahy (19) a (20). Po úpravě se dostává vztah pro ztrátový činitel

$$tg\delta = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \cdot \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (22)$$

Uvedené vztahy (18) až (22) platí za předpokladu, že nosiče dipólových momentů se vzájemně neovlivňují, všechny dipóly mají tvar koule, mají stejné relaxační doby τ a jejich orientace bez přítomnosti elektrického pole je ve všech směrech stejně pravděpodobná. Vztahy dále počítají, že frekvence elektrického pole je mnohem menší než frekvence tepelných kmitů nosičů náboje a s rovností velikostí vnitřního a vnějšího elektrického pole. Frekvenční závislost ε' , ε'' a $tg\delta$ je na Obr. 4. Oblast poklesu reálné části komplexní permitivity ε' je nazývána jako dielektrická disperze.

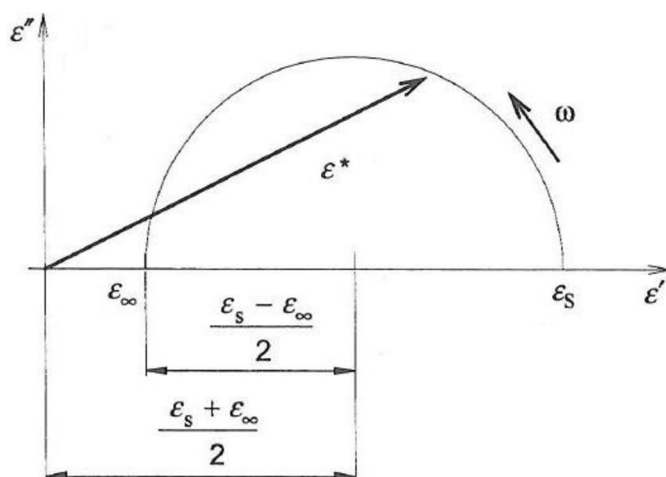


Obr. 4: Frekvenční závislost ε' , ε'' a $\text{tg } \delta$ při relaxační polarizaci podle Debyeho teorie [19]

Pro ověření Debyeho vztahů, vznikla rovnice

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (23)$$

eliminací členu $\omega \cdot \tau$ z rovnic pro reálnou a imaginární složku komplexní permitivity. Grafické znázornění rovnice (23) se nazývá Cole-Cole diagram. Jedná se o závislost $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$ při konstantní teplotě.



Obr. 5: Cole-Cole diagram [19]

Uvedený Cole-Cole diagram zobrazuje pouze ideální tvar. U reálných dielektrik se však relaxační doby skládají z více se lišících skupin polárních molekul, které mají rozdílné relaxační doby. Pro popis dielektrické polarizace reálných dielektrik bylo odvozeno několik vztahů. Tyto vztahy mají empirický charakter. První popis uvádí Debye-Coleho-Coleho rovnice

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha}} \quad (24)$$

kde α je činitel, vyjadřující rozdělení relaxačních dob (nabývá hodnot 0 – 1), τ_0 je nejpravděpodobnější relaxační doba, okolo které jsou relaxační doby rozloženy. Grafickým vyjádřením je Cole-Cole diagram se středem pod osou ε' . Další matematická formulace se nazývá Cole – Davidsonova rovnice, její tvar je

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega \cdot \tau_0)^\beta} \quad (25)$$

kde β je distribuční činitel. Grafickým vyjádřením rovnice (25) je Coleho – Davidsonův asymetrický diagram. Poslední používanou matematickou formulací je Havriliak – Negamiho rovnice

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha}]^\beta} \quad (26)$$

kde α vyjadřuje vzájemnou kooperativu otáčejících se dipólů a β je míra prostorového omezení otáčejících se dipólů. Grafickým zobrazením je Havriliakův – Negamiho asymetrický diagram.

Uvedené matematické formulace vyjadřují frekvenční závislost komplexní permitivity při konstantní teplotě. Závislost relaxační doby na teplotě lze vyjádřit následujícím vztahem

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{W}{k \cdot T}} \quad (27)$$

kde W je aktivační energie probíhajícího děje, τ_0 je relaxační doba pro nulovou aktivační energii a k je Boltzmannova konstanta. Pomocí Debyeovi rovnice lze pak získat vztah pro teplotní závislost komplexní relativní permitivity za předpokladu konstantní frekvence a existence jedné relaxační doby děje

$$\varepsilon^*(T) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega \cdot \tau_0 \cdot e^{\frac{W}{k \cdot T}}} \quad (28)$$

Využitím Havriliak – Negamiho rovnice a distribučních parametrů lze komplexní permitivitu závislou na teplotě vyjádřit [15][19]

$$\varepsilon^*(T) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left[1 + \left(j\omega \cdot \tau_0 \cdot e^{\frac{W}{k \cdot T}}\right)^{1-\alpha}\right]^\beta} \quad (29)$$

3.1.4 Elektrická vodivost a vnitřní rezistivita kapalin

Elektrická vodivost kapalných izolantů souvisí s chemickým složením, strukturou a obsahem nečistot a příměsí. Za běžných podmínek mají kapaliny těsné uspořádání molekul, které dají výskytu silných mezimolekulárních sil s krátkým dosahem. Oproti plynům mají značně omezený pohyb molekul a jejich zvýšenou koncentraci. To vede k vzniku nestabilních neustále se měnících uspořádání tzv. klastrů. Intermolekulární interakce značně ovlivňují mnoho vlastností kapalin včetně elektrické vodivosti. Podle chemických vazeb v molekulách se rozlišují na kapaliny s kovalentními vazbami (zde patří i minerální a rostlinné oleje), kapaliny s iontovými nebo převážně iontovými vazbami a kapaliny s kovovými vazbami. Elektroizolační kapaliny mají kovalentní vazby v molekulách, u nepolárních kapalin je dána vodivost obsahem disociovaných příměsí jako jsou nečistoty a především vlhkost. U polárních kapalin je elektrická vodivost dána disociovanými příměsmi a nepatrnou disociací vlastních molekul kapaliny. Elektrická vodivost kapalin se dělí na iontovou, elektroforetickou a elektronovou (ta se objevuje pouze u silných elektrických polí).

Iontová elektrická vodivost kapalných izolantů se dělí na vlastní a nevlastní. Vlastní elektrická vodivost kapaliny je vyvolána pohybem iontů vzniklých disociací molekul. Stupeň disociace určuje relativní permitivita. U nepolárních kapalin je stupeň disociace menší než u polárních kapalin. Nevlastní elektrická vodivost se vyskytuje téměř ve všech kapalných izolantů a je způsobena disociovanými příměsmi. Stupeň disociace určuje struktura příměsí, jejich koncentrace a relativní permitivita rozpouštědla. Mechanismus iontové vodivosti kapalin spočívá v přeskokách iontů mezi rovnovážnými polohami, které jsou odděleny potenciálovými bariérami. U elektroizolačních kapalin není driftová pohyblivost iontů závislá na intenzitě přiloženého elektrického pole. Působení tepla dochází k výrazné změně driftové pohyblivosti iontů, proto je elektrická vodivost velmi teplotně závislá. Matematické formulace jsou odvozeny z modelu dvojité potenciálové jámy, platí vztah

$$\gamma = \frac{n \cdot f_0 \cdot q^2 \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} \cdot e^{-\frac{W}{k \cdot T}} \quad (30)$$

kde n je koncentrace volných nosičů náboje, f_0 je frekvence vlastních tepelných kmitů okolo rovnovážných poloh, q je náboj iontu, l je vzdálenost, která odděluje rovnovážné polohy, k je Boltzmannova konstanta, W výška potenciálové bariéry a T je termodynamická teplota. Vztah (30) lze pomocí substituce zjednodušit do tvaru

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \quad (31)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty. Pohyblivost nosičů elektrického náboje je dále spojena s viskozitou. Viskozita ovlivňuje elektrickou vodivost kapalin, s rostoucí teplotou se snižuje hodnota dynamické viskozity a tím se zvyšuje pohyblivost. Ve vysokých teplotách hraje roli disociace molekul příměsí.

Elektroforetická vodivost kapalin se vyskytuje v systémech koloidních látek. Volnými nositeli jsou koloidní částice. Je tvořena dvěma fázemi. První fáze se nazývá disperzní fází a je tvořená jemnými částicemi. Tato fáze je rozptýlená ve fázi druhé tzv. disperzní prostředí. Výsledný vztah pro elektroforetickou vodivost je

$$\gamma = \frac{n_k \cdot r \cdot \xi^2 \cdot \varepsilon^2}{6 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (32)$$

kde n_k je koncentrace koloidních částic, r je poloměr koloidní částice (předpokládaný tvar koule), ξ je tzv. elektrokinetický potenciál (nabývá hodnot 0,05 – 0,07 V), ε je permitivita kapaliny a η je dynamický viskozita.

Elektrickou vodivost jde vyjádřit jako převrácenou hodnotu vnitřní rezistivity podle vztahu:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad (33)$$

kde ρ je rezistivita (měrný elektrický odpor) a γ je elektrická vodivost. Jednotkou vnitřní rezistivity je $\Omega \cdot m$, v praxi se používá také $\Omega \cdot cm$. Je to jeden ze základních parametrů, kterým určujeme jakost elektroizolační kapaliny. S rostoucí teplotou se snižuje viskozita, tím roste pohyb koloidních částic a iontů, což vede ke zvýšení elektrické vodivosti a tím ke snížení rezistivity. Závislost rezistivity na teplotě lze zapsat obdobným vztahem jako je vztah (31). Matematické vyjádření je

$$\rho = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (34)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty. Měřením vnitřní rezistivity dostáváme informace o stavu kapaliny. Konkrétně zdali obsahuje vodu a cizí složky. Vnitřní rezistivitu určujeme z protékajícího proudu vzorkem elektroizolační kapaliny. Pro zachycení velmi malých proudů se používá pikoampérmetr. Standardně se měří v měřicí nádobě, ke které je připojen kladný potenciál na venkovní straně, při intenzitě pole $0,25 \text{ MV} \cdot m^{-1}$. Použité zkušební napětí se volí podle druhu materiálu. Vnitřní rezistivita se počítá z naměřeného odporu podle Ohmova zákona, z přiloženého napětí a proudu protékající vzorkem. Vnitřní rezistivita se vyjádří vztahem:

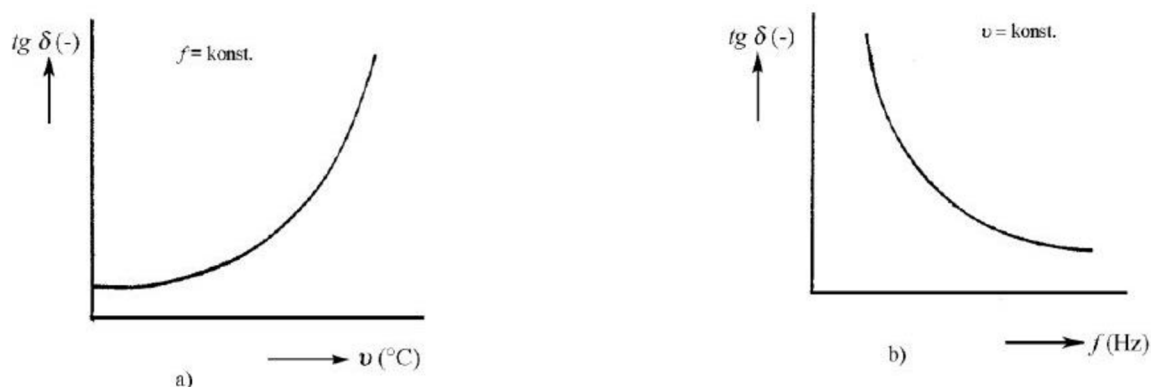
$$\rho_v = \frac{S_{ef}}{h} \cdot R_v \quad (35)$$

kde ρ_v vnitřní rezistivita, S_{ef} efektivní plocha měřicí elektrody, h je tloušťka vzorku a R_v je naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu v Ω . [14][18]

3.1.5 Dielektrické ztráty v kapalných izolantech

Ztrátový činitel se značí $tg \delta$ a vyjadřuje dielektrické ztráty, které jsou úměrné příkonu, který se přemění v teplo působením střídavého elektrického pole. Teplo způsobí pokles rezistivity a zvýšení procházejícího proudu. Tím se olej a izolace zahřívá. Působením tepla dochází k rychlejší degradaci, která je způsobená fyzikálně chemickými pochody.

Čisté izolační oleje jsou bez příměsí polárního charakteru a přítomnosti nečistot. Jejich dielektrické ztráty jsou dány vodivostí dielektrika. Elektrická vodivost i ztrátový činitel u čistých olejů mají nízkou hodnotu. Na Obr. 6 jsou zobrazeny jejich teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele.[18]



Obr. 6: Závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ na teplotě (graf (a)) a frekvenci (graf (b)) nepolárních kapalných izolantů [14]

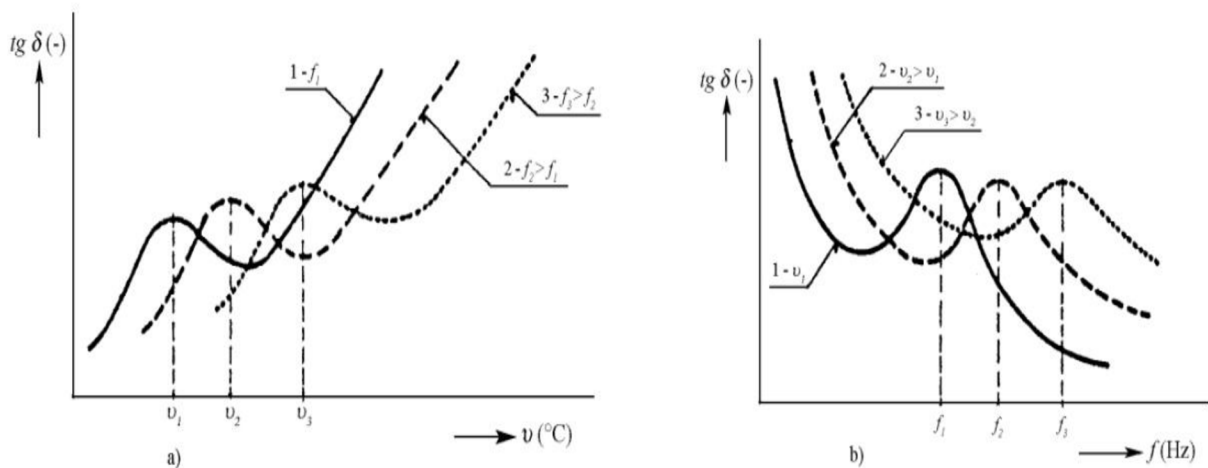
U nepolárních kapalin má závislost dielektrických ztrát na teplotě exponenciální charakter, který je dán nárůstem elektrické vodivosti. Frekvenční závislost ztrátového činitele $tg \delta$ hyperbolicky klesá, ztrátový činitel je dán vztahem

$$tg \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0} = \frac{1}{\omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho} \quad (36)$$

V polárních kapalných izolantech jsou dielektrické ztráty dány vodivostními ztrátami tak i polarizačními ztrátami. Degradaci se v izolačních olejích tvoří nečistoty, polární a iontové složky. Polarizační složka je tvořena produkty oxidace, vodou a jinými rozpuštěnými materiály v oleji. Dielektrické ztráty jsou pak dány těmito složkami. Teplotní závislost dielektrických ztrát má rostoucí exponenciální charakter s typickým maximem a je spojena s nárůstem elektrické vodivosti. Frekvenční závislost ztrátového činitele $tg \delta$ je dána součtem vodivostních a polarizačních ztrát, je dána vztahem

$$tg \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \cdot \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (37)$$

Na Obr. 7 jsou zobrazeny teplotní a frekvenční závislosti ztrátového činitele polárních kapalných izolantů.[18]



Obr. 7: Teplotní (graf a)) a kmitočtová (graf b)) závislost ztrátového činitele $tg \delta$ polárních kapalných izolantů s různými parametry frekvence a teploty [14]

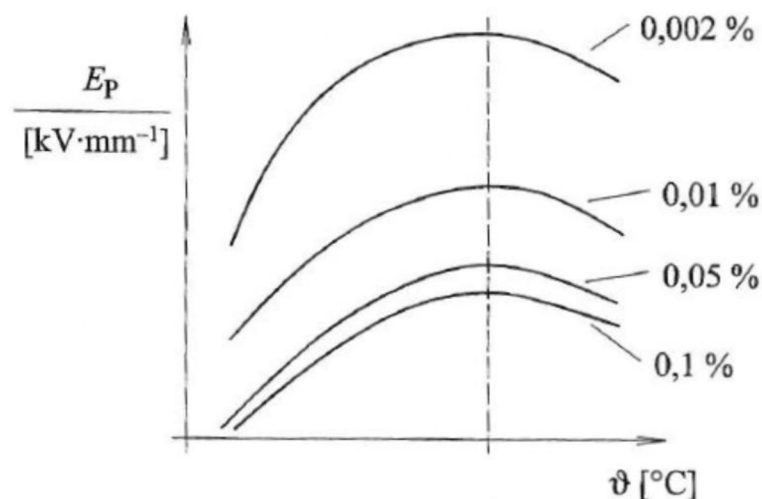
3.1.6 Elektrická pevnost

Jestliže přiložené napětí přeskočí pro daný materiál charakteristickou kritickou mez, dojde k prudkému nárůstu koncentrace volných nosičů i jejich pohyblivosti. To způsobí prudký pokles rezistivity a dojde k nekontrolovatelnému nárůstu konduktivity, který končí výbojem. V kapalném skupenství mluvíme o přeskoku. Přeskok je doprovázen okamžitým poklesem napětí na použitých elektrodách a nárůstem proudu. Oproti průrazům pevných izolantů má přeskok u kapalin pouze dočasné degradační účinky. Při přeskoku dochází k překročení kritické velikosti elektrického napětí přiloženého na materiál. Toto napětí se značí U_p a nazývá se průrazné napětí. Elektrická pevnost je pak definována jako poměr průrazného napětí vztaheného na vzdálenost zkušebních elektrod. Pro elektrickou pevnost E_p platí:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (38)$$

kde d je vzdálenost mezi elektrodami a U_p je průrazné napětí.

Elektrická pevnost kapalin je složitou a ne dobře prozkoumanou záležitostí. I přes to se elektrické výboje v elektroizolačních kapalinách vyznačují určitým charakteristickým chováním. Zpravidla se výboj tvoří v místech, kde je zvýšená koncentrace nečistot. Největší vliv mají plynové bublinky a pevné nečistoty. Plynové bublinky bývají rozptýleny po celém objemu kapaliny, avšak největší koncentrace bublinek bývá na povrchu elektrod. Tato vrstva bublinek způsobí vrstvu s nižší elektrickou pevností než má daná kapalina. Pevné nečistoty se vyznačují značnou pohyblivostí a bývají ve formě koloidních částic a makroskopických nečistot. Působením elektrického pole se tyto částice pohybují, pohybem se mění tvar lokálních polí. Velký vliv na elektrickou pevnost kapalných izolantů má voda. Vliv koncentrace vody na elektrickou pevnost minerálního oleje je zobrazen na Obr. 8.[18][19]



Obr. 8: Teplotní závislost elektrické pevnosti minerálního oleje s různou koncentrací vody v oleji [19]

V dnešní době o mechanismu přeskoku pojednává mnoho teorií. Teorie se dělí do dvou skupin. První skupina vysvětluje mechanismus na principu emise elektronů z elektrod a následné ionizaci. Druhá skupina teorií popisuje tvorbu plynových bublinek, která je rozhodující pro mechanismus. Podle elektrické pevnosti lze tedy určit, jestli olej obsahuje nečistoty, plyny nebo emulgovanou vodu.[19]

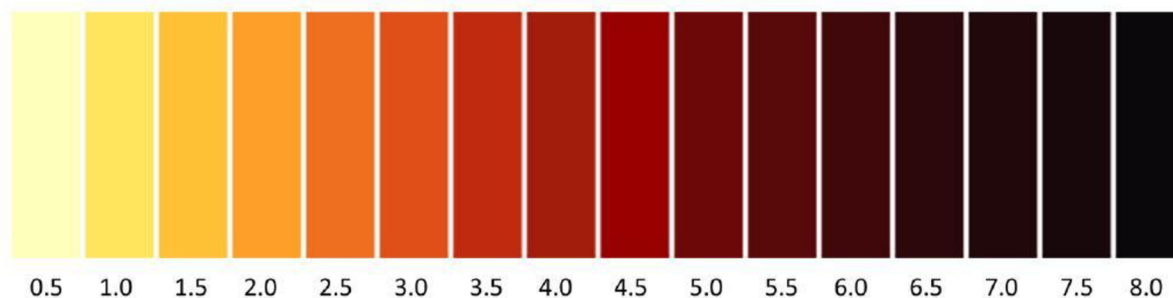
3.2 Fyzikální vlastnosti

Do fyzikálních vlastností, které charakterizují elektroizolační kapaliny, spadá barva, viskozita, hustota, bod vzplanutí a tuhnutí.

3.2.1 Barva

Slouží k orientačnímu posouzení stavu oleje. Olej stárnutím mění svoji barvu na tmavší, díky přítomnosti cizích částic a jiných suspendovaných látek. U některých kapalin se barva značí číslem, popř. písmenem. Stárnutím olej tmavne, největší změny barvy nastávají, když polymerují a polykondenzují primární kyslíkaté produkty za vzniku makromolekulárních látek rozpuštěných v kapalném izolantu. Barvu lze stanovit dvěma způsoby: subjektivně porovnáním barvy vzorku s barevným etalonem a objektivně pomocí měřicího přístroje. [18]

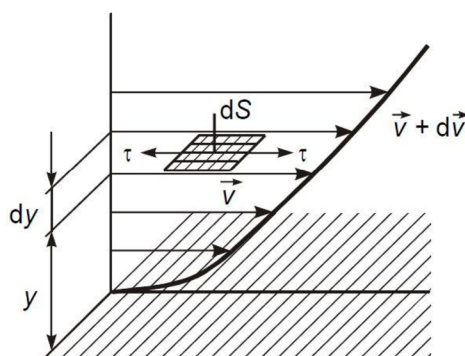
Přístroj na měření barvy se nazývá kolorimetr. Je složen ze zdroje světla, barevných skleněných etalonů, zkumavky s uzavíratelným víčkem na vzorek a okuláru. Stanovením barvy se zabývá norma ČSN ISO 2049. Skleněné barevné etalony jsou dány chromatickými souřadnicemi (červená, zelená, modrá). Pro názornost je zde uvedena stupnice barev na Obr. 9.[7]



Obr. 9: Demonstrativní škála barev dle normy ISO 2049 [23]

3.2.2 Viskozita

Viskozita charakterizuje vnitřní tření kapalin. Při proudění reálné kapaliny dochází k relativnímu pohybu jejích částí, tudíž mezi dvěma po sobě se posouvajícími vrstvami kapaliny dochází ke tření. Závisí na přitažlivých silách mezi částicemi kapaliny. Třecí tečná síla a tečné smykové napětí τ jsou nenulové. Tečné napětí se zvyšuje, čím více se mění rychlost od vrstvy k vrstvě. Změna rychlosti, kterou bychom pozorovali při postupu od vrstvy k vrstvě kolmo ke směru proudění, je charakterizována gradientem rychlosti (Obr. 10) ve směru kolmém k proudění.



Obr. 10: Gradient rychlosti [20]

Používáme tzv. konstantu úměrnosti η , která se nazývá dynamická viskozita. Uvedeme vztah (39):

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (39)$$

kde v je kinematická viskozita a ρ je hustota kapaliny. Jednotkou kinematické viskozity je m^2s^{-1} . Pokud kapaliny splňují vztah (40):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (40)$$

kde τ je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti, nazýváme tyto kapaliny newtonovské. Viskozita dále závisí na teplotě a tlaku. S rostoucí teplotou klesá, s rostoucím tlakem vzrůstá (pouze u velmi vysokých tlaků). Závislost viskozity na teplotě při stálém tlaku je:

$$\eta = \exp \left(A + \frac{B}{T} \right) \quad (41)$$

kde T je termodynamická teplota a A , B jsou empirické konstanty. Dále je třeba zmínit dva důležité vztahy týkající se viskozity a to Poiseuilleův vztah a Stokesův vzorec. Poiseuilleův vztah popisuje chování newtonovské kapaliny proudící malou rychlostí úzkou trubicí, tudíž její vektory rychlosti jsou rozloženy v osovém řezu parabolicky a proudění je laminární. Stokesův vzorec popisuje pohyb tělesa v kapalině, kdy kapalina klade jeho pohybu odpor, který je při pomalém proudění přímo úměrný rychlosti. [20]

3.2.3 Hustota

Hustota patří mezi základní veličinu charakterizující všechny látky. Je dána vztahem (42):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (42)$$

kde m je hmotnost a V objem. Jednotkou je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Hustota je jeden z méně důležitých parametrů elektroizolačních kapalin. Můžeme z ní například počítat celkovou hmotnost transformátoru.

3.2.4 Bod vzplanutí a tuhnutí

Bod vzplanutí je teplota, při které se vytvoří směs par testované kapaliny se vzduchem a při přiblížení plaménku dojde ke vznícení a následně k okamžitému uhasnutí. Pokud tento plamen okamžitě nezhasíná a trvale hoří, nazýváme tuto teplotu bodem hoření.

Pro chod transformátoru v extrémně nízkých teplotách je důležitý bod tuhnutí. Jedná se o teplotu, kdy elektroizolační kapalina tuhne a dochází v ní k vylučování krystalů. Tím roste celková viskozita kapaliny. [18]

3.3 Chemické vlastnosti

Do chemických vlastností patří číslo kyselosti a obsah vody v oleji

3.3.1 Číslo kyselosti

Stárnutím oleje se zvyšuje množství kyselých látek, tudíž je to výborný parametr jak určit stáří a stav oleje. V dnešní době mají oleje jakostní předpisy, které limitují obsah kyselých látek v oleji. Norma ČSN EN IEC 62021-1 ho předkládá jako kritérium k posouzení stupně zestárnutí nebo znehodnocení elektroizolačních kapalin. Definice čísla kyselosti ho stanovuje jako množství hydroxidu draselného (KOH), které je potřeba v nevodném

alkoholickém prostředí k neutralizaci organických a anorganických kyselých reagujících složek v 1g oleje. Pro stanovení čísla kyselosti se využívá dvou metod: metoda potenciometrická a metoda stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B.

3.3.2 Obsah vody v oleji

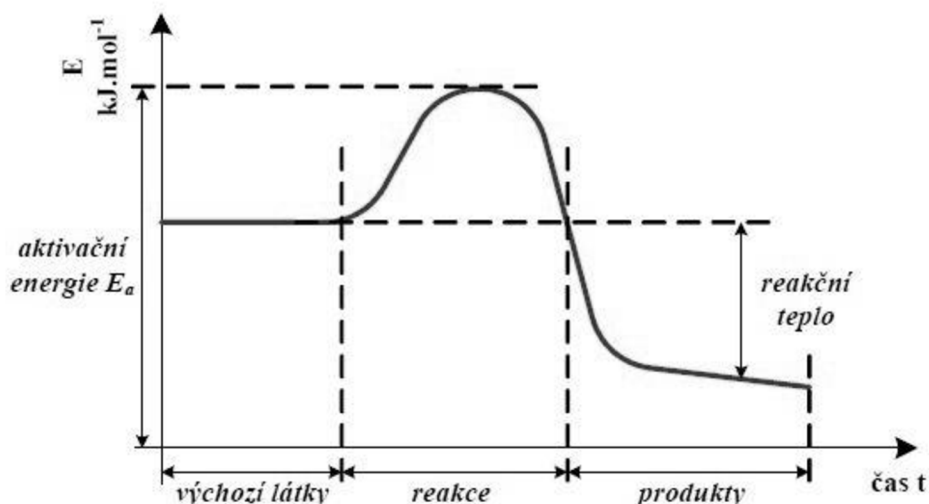
Jeden z důvodů zhoršení vlastností oleje, je obsah vody v oleji. Největší vliv má na elektrickou pevnost. Voda může vzniknout jako produkt degradace při polykondenzačních reakcí. Hlavně se však dostává z vlhkosti okolí. V oleji se voda vyskytuje v rozpuštěné, emulgované a volné podobě. Přítomnost vody v elektroizolačních kapalinách můžeme zjistit dvěma metodami. První je coulometrická titrační metoda podle normy ČSN EN ISO 12937, druhá je metoda založená na reakci hydridu vápníku s vodou za vzniku vodíku, který je úměrný obsahu vlhkosti.

4 Degradace elektroizolačních kapalin

Kvalita elektroizolačních kapalin je velmi důležitá pro spolehlivý a bezporuchový chod strojů. Provozem se však kapalina degraduje a její parametry se zhoršují. U transformátorů se stárnutí kapalin nepříznivě projevuje na vytváření potenciálových bariér, které jsou hlavním důvodem poruch. Degradace je soubor procesů v čase, které při provozních podmínkách způsobují fyzikální, elektrické a chemické změny vlastností kapaliny. U zařízení dochází k poklesu spolehlivosti a tím i provozní bezpečnosti. Pokles spolehlivosti, může být dán zhoršeným chlazením následkem usazování kalu v olejových kanálcích a vinutí, zmenšením elektrické pevnosti oleje především díky přítomnosti vody a zmenšení mechanické pevnosti celulózových izolantů poškozených kyselinami vzniklých při stárnutí. Při degradaci elektroizolačních kapalin platí vzájemná závislost, kdy se konstrukční části vzájemně ovlivňují při degradaci (např. olej a papírová izolace, vinutí atd.). Proto je nutná údržba těchto částí. U elektroizolačních kapalin mluvíme o odebrání vzorků a následné analýze posuzování kvality a případná výměna nebo regenerace kapaliny. Vlivy, které způsobují degradaci, se dělí na: působení kyslíku za současného působení tepla, působení energií (tepla, elektrické pole atd.), působení látek kyselá a alkalická povahy a také vliv rovnoměrnosti zatížení. Každá elektroizolační kapalina má svou dobu života, tedy dobu, po kterou je schopna konat svoji funkci. Po uplynulé době života izolant ztrácí veškeré důležité technické vlastnosti a stává se nepoužitelným. Na elektroizolační kapaliny má největší vliv působení tepla, působení elektrického pole a oxidace. V následujících kapitolách budou popsány teplotní, elektrické a více-faktorové modely stárnutí. [8]

4.1 Teplotní stárnutí

K provoznímu stárnutí elektroizolační kapalin dochází při teplotě od 50 °C do 70 °C. U elektroizolační kapaliny může dojít ke zvýšení teploty globálně v celém jejím objemu nebo lokálně jen v některých místech. Globální oteplení kapaliny způsobí například vyšší zatížení transformátoru nebo špatný stav použité kapaliny. Lokální zvýšení teploty je způsobeno elektrickými poruchami v podobě obloukových výbojů.[32]. Působením tepla vznikají v kapalinách nevratné chemické procesy, jako je oxidace, polymerace, polykondenzace, rozklad některých složek, depolymerace a zesíťování makromolekul. S rostoucí teplotou roste rychlost uvedených degradačních procesů. Tyto procesy mají u elektroizolačních kapalin vliv zejména na elektrické parametry (ztrátový činitel atd.). Při tepelném stárnutí hlavní roli hraje množství energie (tepla), které je látce dodána, aby mohla proběhnout reakce, která má za následek degradaci elektroizolační kapaliny. Tuto energii označujeme jako aktivační. V praxi čím vyšší tuto energii materiál dá, tím více odolává degradačním pochodům v jeho vnitřní struktuře. Podstata této energie je na Obr. 11.[25]



Obr. 11: Proces aktivační energie [25]

Při překonání této energetické bariéry získávají částice energii k opuštění stabilního stavu a způsobí tak iniciaci degračních procesů. Díky velké různorodosti provozních podmínek, jsou i velmi různorodé degrační procesy. Rychlost reakce degradace je popsána Arrheniovou rovnicí:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \quad (43)$$

kde k je rychlostní konstanta, A je faktor udávající frekvenci střetávajících se molekul, E je aktivační energie udávající výši energetické bariéry, kterou musí překonat $m_0 - m$ molekul, aby mohly vstoupit do reakce, R je univerzální plynová konstanta a T je absolutní teplota.[18]

Prvním matematickým popisem tepelného stárnutí se zabýval V. M. Montsinger. Experimentálně vyšetřoval chování některých izolačních materiálů vystavených vysokým teplotám ve snaze najít závislost mezi teplotou a časem do poruchy. Zjistil, že tato závislost lze vyjádřit exponenciální funkcí známou jako Montsingerův vztah:

$$L_T = A \cdot \exp[-m \cdot \Theta] \quad (44)$$

kde L_T je doba života izolačních materiálů, Θ je teplota stárnutí, A a m jsou materiálové konstanty. Zlogaritmováním rovnice (44) se získá rovnice ve tvaru

$$\ln L_T = A - m \cdot \Theta \quad (45)$$

Montsinger z rovnice (45) zobrazené v semilogaritmickém měřítku odvodil, že pokud teplota, kterou je izolační materiál vystaven, stoupne o 8 °C, zkrátí tím dobu života L_T na polovinu. Naopak snížením teploty o 8 °C se doba života zdvojnásobí na $2L_T$. Tato závislost

se nazývá Montsingerovo pravidlo. Toto pravidlo Montsinger vyčíslil pomocí konstanty A , kterou zjistil experimentálně a konstanty m , kdy

$$m = \frac{\ln 2}{\Delta\theta} = \frac{0,69}{8} = 0,086 \quad (46)$$

Dosazením konstant dostáváme Montsingerovo pravidlo, které je popsáno rovnicí

$$L_T = 7,15 \cdot 10^4 \cdot \exp[-0,086 \cdot \theta] \quad (47)$$

Montsingerova rovnice však obecně neplatí, protože byla stanovena empiricky pouze na konkrétní izolační materiály.[16][22]

Nový pohled na stárnutí elektroizolačních materiálů přinesl Dakin. Dakinova teorie nahlíží na proces degradace jako na chemický proces, kdy účinek teploty zvyšuje rychlost chemických reakcí. Vztah, kterým je tato teorie popsána je stejný jako v technické praxi používána Arrheniova rovnice (43) a je ve tvaru

$$R = R' \cdot \exp\left[-\frac{\Delta W_A}{k \cdot \theta}\right] \quad (48)$$

kde R je rychlostní konstanta degradace, R' je celkový počet vzájemných srážek reagujících molekul za jednotku času, ΔW_A je aktivační energie hlavní zapojené reakce, k je Boltzmannova konstanta a θ je teplota stárnutí. Rovnice stanovuje mez, od které se izolace považuje za nepoužitelnou. Tato mez je tepelná životnost, neboli doba života L_T izolačního materiálu a je nepřímo úměrná rychlosti změn, které v něm probíhají. Je dána rovnicí

$$L_T = \frac{C}{R} = A \cdot \exp\left[\frac{B}{\theta}\right] \quad (49)$$

kde C je konstanta úměrnosti, konstanty A a B jsou dány vztahy

$$A = \frac{C}{R'} \quad (50)$$

$$B = \frac{\Delta W_A}{k} \quad (51)$$

Rovnice (49) je známá jako Arrheniův model a je běžně zobrazována v tzv. Arrheniově diagramu. Diagram je závislostí $\log(L_T)$ na záporné převrácené hodnotě teploty $-1/\theta$. To umožní extrapolaci výsledků při testovací teplotě do běžné provozní teploty. Mezinárodní standarty zavedly teplotní index TI, který stanovuje tepelnou odolnost izolačních materiálů. V technické praxi je rovnice (49) považována jako základ pro výpočet doby života izolačních materiálů.[22]

Další interpretaci tepelného stárnutí přinesl tzv. Büssingův teorém. Svou teorii staví na základě Monsingerovi rovnice (44) a Arrhenniově rovnice (43), kdy rychlost reakce není konstantní a závisí na okamžité koncentraci reagujících složek, zapsáno rovnicí

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot c^n \quad (52)$$

kde c představuje koncentraci reagujících složek, k je rychlost reakce, která se počítá pomocí rovnice (43) a n je řád reakce (nabývá hodnot 1 – 3). Teorém popisuje určitou závislost mezi fyzikálními vlastnostmi izolantu a koncentrací reaktantu pomocí materiálové konstanty B . Odvozená rovnice má tvar

$$L_T = B \cdot \exp \left[\frac{b}{\theta} \right] \quad (53)$$

a její logaritmický tvar

$$\ln L_T = B + \frac{b}{\theta} \quad (54)$$

kde materiálové konstanty b , B lze stanovit fyzikálně chemickými výpočty na základě chemické reakční kinetiky.[16]

4.2 Elektrické stárnutí

Elektroizolační kapaliny jsou pod stálým působením elektrického pole. Proto je elektrické stárnutí jeden z dalších faktorů, který ovlivňuje parametry a jakost izolačních kapalin. Působením elektrického pole se zvyšují dielektrické ztráty izolantu a tím dochází k jeho namáhání. Při vyšších intenzitách elektrického pole může v místě lokálního namáhání vzniknout průraz. Elektrické stárnutí způsobuje vznik částečných výbojů, plazivých proudů, elektrolýzy atd. O elektrickém stárnutí existuje více teorií, protože tato problematika není zcela objasněna. U olejem plněných transformátorů dochází k částečným výbojům z důvodu nedokonalosti technologické povahy. Jde například o oddělování jednotlivých vodivých i nevodivých částí v průběhu degradace nebo o nedostatečné vysušení a následná impregnace papírové izolace. Při přivedení vysokého napětí do transformátoru dochází k ionizaci těchto nedokonalostí, která může skončit přeskokem.[12][30]

Základní matematické modely elektrického namáhání izolačních materiálů byly popsány v sedmdesátých letech. V praxi se používají dva základní modely. První je tzv. inverzní mocninný model, kde

$$L_E = C_1 \cdot E^{-n} \quad (55)$$

a druhý model popisující elektrické namáhání je tzv. exponenciální, kde

$$L_E = C_E \cdot \exp[-h \cdot E] \quad (56)$$

kde C_I , C_E , n a h jsou materiálové konstanty závislé na teplotě a dalších ovlivňujících faktorech, E je intenzita elektrického pole. Konstanty n a h jsou také známy jako koeficienty elektrické odolnosti a jsou považovány jako základní parametr charakterizující izolační materiály. U zrychlených zkoušek je preferován vztah (55). Jedná se o empirické vztahy popisující dobu života izolačních materiálů vystavených účinkům elektrického pole. Tyto vztahy však nezávisí na struktuře daného materiálu a na rozložení elektrického pole (konfigurace elektrod). Dále nepodmiňují znalost degradačních procesů a mechanismů vyvolaných elektrickým polem probíhajících ve struktuře a nezohledňují přítomnost částečných výbojů.[22][16] Kvůli existenci prahových hodnot, postrádají platnost při působení elektrických polí o malé intenzitě. V takových případech vztahy (55) a (56) určují životnost materiálu jako nekonečnou, což není pravda. Prahová hodnota je určena rovnicí

$$L_E = L_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-n} \quad (57)$$

kde L_0 je doba života materiálu bez elektrického namáhání při pokojové teplotě a E_0 je intenzita elektrického pole při které neprobíhají žádné degradační procesy.

Postupem času Dakin modifikoval matematický model s ohledem na prahovou hodnotu. Využitím exponenciální rovnice (56) a rovnice popisující prahovou hodnotu (57) dostal rovnici ve tvaru

$$L_E = C_E \cdot \frac{\exp[-h \cdot E]}{E - E_t} \quad (58)$$

kde E_t je prahová hodnota elektrického namáhání, od které začínají degradační procesy. Úpravou a využitím rovnic (57) a (58) se dostává vztah

$$\frac{L_E}{L_0} = \left(\frac{E - E_t}{E_t - E_0}\right)^{-n} \quad (59)$$

Tato nová interpretace matematicky předložila prahovou hranici elektrického namáhání, u které při působení malých elektrických polí na izolační materiál nelze stanovit dobu života, protože dosahuje extrémně dlouhé doby života. Díky matematickému stanovení prahové hranice se zvýšila spolehlivost izolačních systémů.

Prahová hranice dále vyžaduje modifikaci statistického rámce modelů doby života s ohledem na krátké časy. Modifikace spojuje váhu parametru α z Weibullova rozdělení pravděpodobnosti a modelu doby života. Funkce má tvar

$$F(t, E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (60)$$

kde β je tvarový parametr a t je čas poruchy. Tím se získá obecný poruchový model, který se může značně lišit od Weibullova popisu životnosti materiálů. [22][28]

4.3 Kombinované stárnutí

V případě, kdy je izolační systém vystaven současně více stárnoucím faktorům, nastávají mezi nimi vzájemné interakce. Rozlišujeme dva hlavní typy interakcí. První typ interakce lze popsat jako přímý, kdy simultánní působení více faktorů na materiál je diametrálně odlišné ve srovnání se stavem, kdy na materiál působí tyto faktory jednotlivě. Příkladem prvního typu je oxidace za zvýšené teploty. Samotná působící teplota nemá na materiál radikální vliv, ovšem za přítomnosti kyslíku vzniká oxidační reakce, která se s rostoucí teplotou urychluje. Druhý typ interakcí je nepřímý. Při současném působení několika faktorů na materiál zůstávají působící vlivy nezměněny, jako by působily samostatně, ale k ovlivnění dochází pomocí jejich účinků. Nepřímé interakce mohou být výsledkem působení mechanického a elektrického namáhání. Mikro-praskliny vzniklé mechanickým namáháním vedou k nárůstu částečných výbojů v materiálu. Interakce způsobí, že stárnutí postupuje rychleji ve srovnání s algebraickým součtem jednotlivých účinků namáhání. V elektroizolačních kapalinách hrají větší roli přímé interakce. V dnešní době existuje několik modelů popisujících synergické účinky kombinovaného teplotně-elektrického namáhání. Jedná se o velmi komplexní a náročnou disciplínu, která se neustále výzkumy zdokonaluje. V následujících kapitolách je představeno několik nejznámějších a nejpoužívanějších modelů pro kombinované teplotně-elektrické stárnutí.

4.3.1 Simoniho model

Simoni vytvořil své modely na základě rovnic z termodynamiky, které byly do praxe zavedeny Endicottem. Simoni zavedl tzv. stupeň stárnutí R , který popisoval rychlost stárnutí nebo chemické reakce. Rovnice byla ve tvaru

$$R = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{\theta}\right) \cdot \exp\left[\left(a + \frac{b}{\theta}\right)f(E)\right] \quad (61)$$

kde $f(E)$ je nespécifikovaná funkce přiloženého elektrického pole, a A , B , a , b jsou konstanty. Simony předpokládal, že platí

$$f(E) = \ln \frac{E}{E_0} \quad (62)$$

kde E_0 je elektrické namáhání, které může být zanedbáno (podobně jako tomu je v rovnici (57)). Jako alternativu k rovnici (62) zvolil rovnici

$$f(E) = E - E_0 \quad (63)$$

Z výše uvedených rovnic je zřejmé, že volba $f(E)$ nemá fyzikální oporu. Oba výrazy $f(E)$ Simoniho modelu pro kombinované namáhání jsou kompatibilní s mocninným a exponenciálním modelem.

Kombinované tepelné a elektrické namáhání podle Simoniho způsobí reakční rychlost $R(T, E)$:

$$R(T, E) = R_0 \cdot \exp \left[B \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right] \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\left[n - b \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right]} \quad (64)$$

kde

$$R_0 = A \cdot \exp \left(- \frac{B}{\theta_0} \right) \quad (65)$$

$$n = a + \frac{b}{\theta_0} \quad (66)$$

$$\Delta \frac{1}{\theta} = \frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_0} \quad (67)$$

kde θ_0 je pokojová teplota. Pro vyjádření $f(E)$ se zde používá rovnice (62).

Dalším krokem k vytvoření modelu stárnutí je určení závislosti $L(R)$. Předpokládá se, že stárnutí musí být funkcí nějaké vlastnosti p izolačního systému, tzn. $Stárnutí = F(p)$. V tomto případě je reakční rychlost dána vztahem

$$R(T, E) = \frac{dF(p)}{dt} \quad (68)$$

a při konstantním namáháním v čase platí funkce

$$F(p) = R \cdot t \quad (69)$$

Vlastnost p postupně degraduje a blíží se směrem k mezní hodnotě p_L , která definuje provozuschopnost izolačního systému jako nevyhovující a nastává výskyt poruchy. V tomto bodě platí rovnost $t = L$ a za použití rovnice (69) vzniká tvar

$$L = \frac{F(p_L)}{R} \quad (70)$$

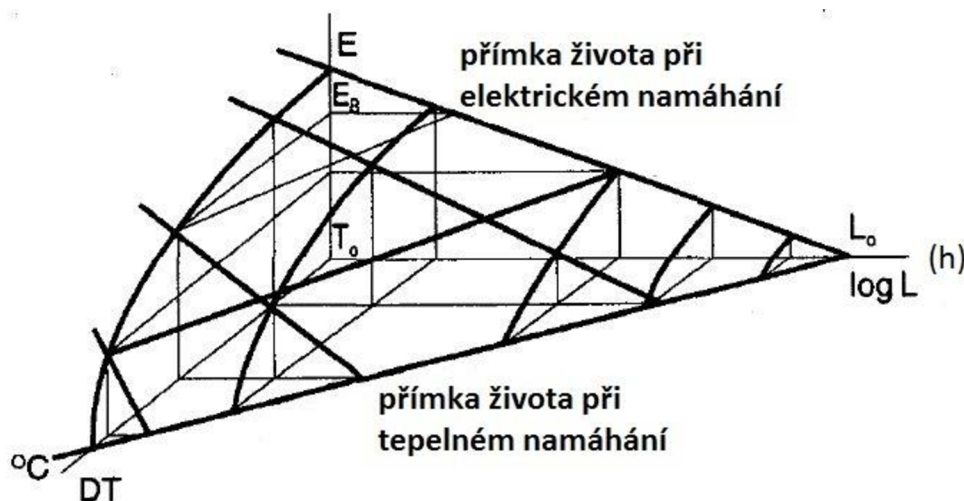
Rovnice (70) byla Montanarim nazvána jako obecná rovnice života. Z ní Simoni obdržel svůj první model

$$L(T, E) = L_0 \cdot \exp \left[-B \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right] \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-N} \quad (71)$$

za předpokladu že platí $E \geq E_0$. L_0 je čas do poruchy při pokojové teplotě a hodnotě intenzity elektrického pole $E = E_0$. Konstanta N má tvar

$$N = n - b \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \quad (72)$$

Rovnice (71) lze zobrazit jako povrch (viz. Obr. 12), který ukazuje závislost doby života při kombinovaném namáhání.



Obr. 12: Simoniho model – model životnosti izolačních materiálů pro kombinované elektrické a tepelné namáhání [11]

Podle rovnic doba života při kombinovaném tepelném a elektrickém namáhání je dána vynásobením výrazů pro samostatné tepelné stárnutí a samostatné elektrické stárnutí s výjimkou pro korekční člen $G(T, E)$, který zahrnuje synergické efekty:

$$\frac{L(T, E)}{L_0} = \frac{L(T)}{L_0} \cdot \frac{L(E)}{L_0} \cdot G(T, E) \quad (73)$$

kde korekční člen

$$G(T, E) = \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\left[b \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right]} \quad (74)$$

4.3.2 Ramuho model

Ramu prezentuje svůj model založený na fyzikální intuici. Model je získán vynásobením faktorů klasických modelů samostatného namáhání a z výpočtů pro synergické účinky. Ramuho model je ve tvaru:

$$L(T, E, \theta) = c(\theta) \cdot E^{-n(\theta)} \cdot \exp \left[-B \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right] \quad (75)$$

kde

$$c(\theta) = \exp \left[c_1 - c_2 \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right] \quad (76)$$

$$n(\theta) = n_1 - n_2 \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \quad (77)$$

kde c_1, c_2, n_1, n_2 jsou konstanty, $\Delta \left(\frac{1}{\theta} \right)$ se vypočítá dle rovnice (67). Ramuho model může být zjednodušen do tvaru

$$L(T, E, \theta) = c \cdot E^{-[n_1 - n_2 \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right)]} \cdot \exp \left[-\tilde{B} \cdot \Delta \left(\frac{1}{\theta} \right) \right] \quad (78)$$

kde c a B jsou konstanty. Pokud je součástí rovnice (78) prahová hodnota elektrického namáhání E_0 a konstanta c je eliminována dosazením za $L = L_0$, za $E = E_0$ a $\theta = \theta_0$ Ramuho model se stane identickým se Simoniho modelem (rovnice (71)).[11]

4.3.3 Fallouho model

Fallou navrhl semi-empirický model stárnutí založený na exponenciálním modelu pro elektrické stárnutí

$$L = \exp \left[A(E) + \frac{B(E)}{\theta} \right] \quad (79)$$

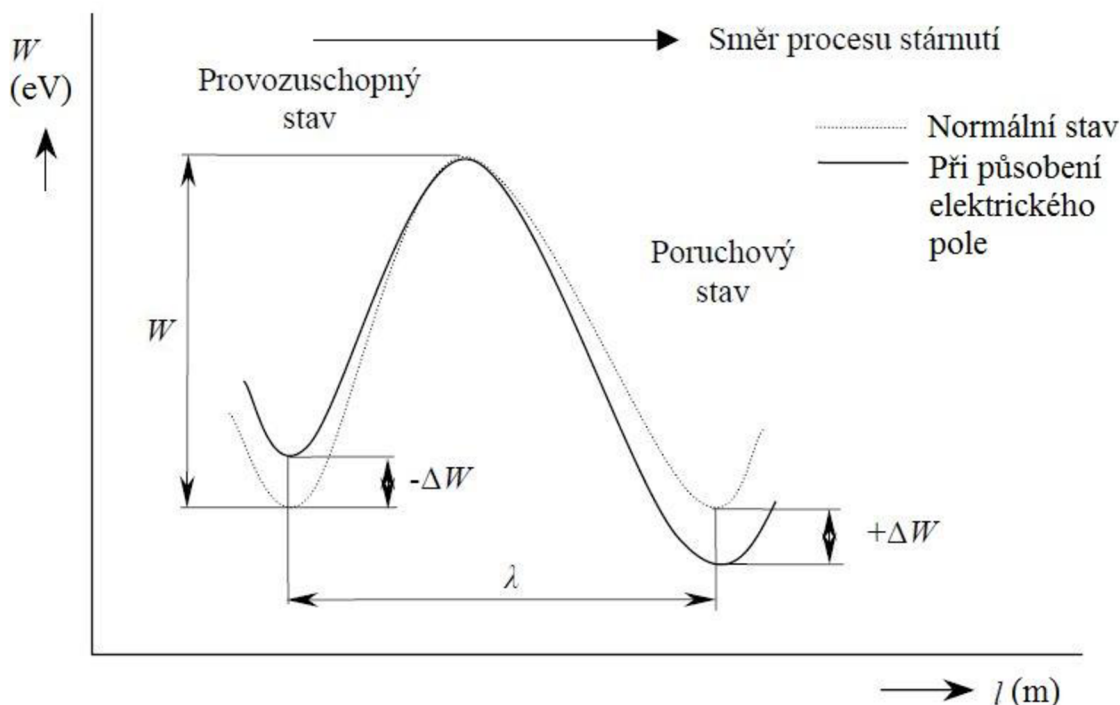
kde $E > 0$, $A(E) = A_1 + A_2 \cdot E$, $B(E) = B_1 + B_2 \cdot E$. Závislosti $A(E)$ a $B(E)$ musí být určeny experimentálně z křivky doby do poruchy při konstantní teplotě. Tento model nebere v úvahu existenci prahového pole pro elektrické stárnutí. Po dosazení konstant a částečné úpravě dostáváme Fallouho model pro dobu života

$$L = \tilde{A}_1 \cdot \exp \left(\frac{B_2}{\theta} \right) \cdot \exp \left[- \left(A_2 + \frac{B_1}{\theta} \right) \cdot E \right] \quad (80)$$

kde $\tilde{A}_1 = \exp A_1$.

4.3.4 Crineho model

Simonioho, Ramuho a Fallohuho model jsou částečně empirickými vztahy. Crineho model je založen na plnohodnotné fyzikální teorii stárnutí. Proces stárnutí vysvětluje pomocí dvojité potenciálové jámy (na Obr. 13). Mezi provozuschopným stavem a stavem selhání je energetická bariéra. Na to, aby se materiál dostal z provozuschopného stavu do stavu selhání, potřebuje překonat energetickou bariéru, která oba stavy odděluje. Pravděpodobnost získání potřebné energie k překonání energetické bariéry je dána Maxwellovo-Boltzmanovým rozdělením. V tomto modelu hraje podstatnou roli působení elektrického pole, které výrazně deformuje energetickou bariéru. Působením elektrického pole se výška bariéry na straně provozuschopného stavu se snižuje o ΔW . Na straně poruchového stavu se naopak zvyšuje o stejnou hodnotu. Z tohoto důvodu elektrické pole značně zvyšuje pravděpodobnost překonání energetické bariéry. Analogicky k jiným modelům je čas potřebný k překonání energetické bariéry definován jako doba života materiálu.



Obr. 13: Crineho model stárnutí s využitím dvojité potenciálové jámy

Crineho model využitím zákonů termodynamiky a Maxwellovo-Boltzmanovým rozdělením stanovuje střední dobu života

$$L = \left(\frac{h}{k \cdot \theta} \right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{k \cdot \theta} \right) \cdot \cosh\left(\frac{q \cdot \lambda \cdot E}{k \cdot \theta} \right) \quad (81)$$

kde h je Planckova konstanta, k je Boltzmanova konstanta, ΔW je volná aktivační energie, λ je vzdálenost mezi oběma stavy a q značí elektrický náboj částic ovlivňující stárnutí. Crineho model přestává být definován, pokud není přítomné elektrické pole a tudíž ztrácí využití. Parametry ΔW a λ jsou závislé na teplotě a nejsou přesně definovány. Určení hodnot

těchto parametrů je obtížné a závisí na daných podmínkách namáhání. Při vysokých intenzitách elektrického pole platí $q \cdot \lambda \cdot E < k \cdot \Theta$ dostává rovnice tvar

$$L = \left(\frac{h}{k \cdot \Theta} \right) \cdot \exp \left(\frac{\Delta W - q \cdot \lambda \cdot E}{k \cdot \Theta} \right) \quad (82)$$

z rovnice plyne, že doba života L se snižuje odečtením hodnoty $q \cdot \lambda \cdot E$ od ΔW . U velmi vysokých hodnot elektrické intenzity pole má křivka života materiálu exponenciální charakter (tj. když platí $q \cdot \lambda \cdot E \ll k \cdot \Theta$). Při nízkých intenzitách elektrického pole koresponduje Crineho model se Simonioho teorií prahové hodnoty, protože křivka doby života má velmi pozvolný klesající charakter. Pro střídavé elektrické pole se zavádí rovnice

$$L = \left(\frac{h}{2 \cdot f \cdot k \cdot \Theta} \right) \cdot \exp \left(\frac{\Delta W}{k \cdot \Theta} \right) \cdot \operatorname{csch} \left(\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{\Delta V \cdot E^2}{k \cdot \Theta} \right) \quad (83)$$

kde V je aktivační úroveň procesu při elektrickém namáhání a f je akcelerační koeficient úměrný frekvenci.[11][31]

4.4 Oxidační stárnutí

Je velmi často způsobeno netěsnostmi zařízení, kde se elektroizolační kapalina nachází. Nejčastěji jsou tyto netěsnosti v nádobě mezi průchodkami a víky. Proto je velmi důležité, aby kapaliny byly v hermetických nádobách, kde se nejvíce zamezí styk kyslíku a kapaliny. Oxidační stárnutí elektroizolační kapaliny vyvolává přítomnost kyslíku, zvýšená teplota a přítomnost kovů. Oxidačním stárnutím vzniká velké množství kyslíkatých látek, jako jsou estery, alkoholy, ketony, aldehydy, kyseliny atd. Při oxidaci dochází k strukturálním změnám a vznikají polární zplodiny, které zvyšují elektrickou vodivost a ztrátový činitel. Vzniklé kyslíkaté látky jsou tedy polární a jsou rozpustné v oleji. Při vzniku kyslíkatých produktů zároveň vznikají vedlejší produkty, jako je voda a oxid uhličitý. Tyto produkty zhoršují elektrické vlastnosti oleje, zejména elektrickou pevnost a vzniklé kyseliny napadají přítomné kovové materiály. Viskozita a hustota oleje se postupně zvyšuje díky makromolekulárním látkám vzniklých polymerací a polykondenzací kyslíkatých produktů s reaktivními skupinami. Tyto makromolekulární látky se postupem času stávají nerozpustné, kdy už mluvíme o kalech.[8]

4.5 Kaly

Do kalů řadíme malé pevné částice vzniklé polymerací a polykondenzací kyslíkatých produktů, které se vážou na polární uhlovodíky, dále mýdla vyšších mastných kyselin a také asfaltény. Působením vody, pevných částic a mastných kyselin vznikají tzv. mýdla. Asfaltény vznikají při oxidaci oxidací aromatických a aromaticko-cyklanických uhlovodíků. Kaly se usazují na částech v nádobě, kde způsobují zvýšení teploty, tím vzniká polymerační reakce, při které vznikají další nežádoucí produkty. Kaly se zpravidla usazují na teplejších místech vinutí a na povrchu plechů. Dokážou ucpat kanálky mezi vinutím a tím se rapidně zhorší odvod tepla a dochází k celkovému přehřívání, který může při zanedbání skončit havárií. Kaly

mají schopnost zadržovat vlhkost, tím snižují izolační odpor mezi závity ve vinutí a může vzniknout zkrat. Kaly se dají odstranit procesem regenerace oleje nebo jeho celkovou výměnou.[8]

5 Diagnostika elektroizolačních kapalin

K diagnostice elektroizolačních kapalin se dá použít nespočet metod, které analyzují veličiny zmíněné v kapitole 3. Tato diplomová práce se zaměří na měření relativní permitivity, ztrátového činitele a rezistivity při stejnosměrném napětí. Uvedené metody budou popsány podle normy ČSN EN 60247.

5.1 Měření relativní permitivity a ztrátového činitele dle ČSN EN 60247

5.1.1 Popis zařízení

K měření relativní permitivity a ztrátového činitele se využívá tzv. cely, kde je umístěn zkoumaný vzorek kapaliny. Elektrodotový systém musí být konstruována, aby šla snadno demontovat, a tím usnadnit čištění. Musí umožnit měření teploty, včetně její regulace. Teplota je dosahována pomocí elektrického ohřevu elektrodotového systému nebo ohřevem v lázni. Musí být konstruována z inertního nepórovitého materiálu odolávajícího vysokým teplotám. Téměř stejné požadavky kladené na materiál jsou kladeny i na elektrodoty, které musejí mít hladký povrch. Materiály jako hliník a jeho slitiny se nedoporučují používat, protože jsou napadány alkalickými detergenty. Izolační materiály použité k upevnění elektrodot musí mít nízký ztrátový činitel a vysokou rezistivitu. Vzdálenost povrchu kapaliny a pevného izolačního materiálu, mezi měřicí elektrodotou a ochranou musí být dostatečné velká, aby odolávala zkušebnímu napětí. Elektrodotové systémy pro kapaliny s nižší viskozitou a do napětí 2 kV jsou trojvývodové nebo dvojvývodové. Trojvývodové měřicí elektrodotové systémy se používají pro určení permitivity s vysokou přesností. Měřicí elektrodot musí být adekvátně odstíněna. Pro analyzování vzorků je pak možno využít jakýkoli měřicí přístroj pro měření střídavé kapacity a $tg\delta$.

5.1.2 Měřicí metoda

Pro měření ztrátového činitele $tg\delta$ je potřeba nastavit takové střídané napětí o frekvenci 40 až 62 Hz, aby byla kapalina vystavená napětíovému namáhání 0,03 kV/mm až 1kV/mm. Měření se provádí po 10 minutách dosažení požadované teploty v rozmezí ± 1 °C. Napětí se přikládá jen v průběhu měření. Po skončení měření, které zahrnuje i permitivitu s rezistivitou, by se měl elektrodotový systém vyprázdnit a naplnit podruhé. Pro provedení druhého měření, by se neměli hodnoty ztrátového činitele lišit více než 0,0001.

Pro měření relativní permitivity se musí změřit kapacita čistého elektrodotového systému se vzduchem. Dále se změří kapacita elektrodotového systému naplněného kapalinou se známou permitivitou a vypočítá se elektrodotová konstanta C_e (84) a korekční kapacita C_g (85):

$$C_e = \frac{C_n - C_a}{\epsilon_n - 1} \quad (84)$$

kde C_n je kapacita elektrodového systému naplněného kalibrační kapalinou, C_a kapacita elektrodového systému se vzduchem a ε_n je hodnota permitivity kalibrační kapaliny.

$$C_g = C_a - C_e \quad (85)$$

Poté se změří kapacita C_x elektrodového systému se zkoušenou kapalinou, ze které se vypočítá permitivita ε_x (86):

$$\varepsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_e} \quad (86)$$

Pokud je trojvůdový elektrodový systém dobře a přesně konstruován a není požadavek na zvýšenou přesnost, může se člen C_g zanedbat. Dostáváme vztah (87):

$$\varepsilon_x = \frac{C_x}{C_a} \quad (87)$$

Relativní permitivita se měří současně se ztrátovým činitelem. Pro tříelektrodovou nádobku platí vztahy (88) a (89) pro ztrátový činitel menší než 0,1 a vztahy (90) a (91) pro ztrátový činitel větší než 0,1.

$$tg \delta = tg \delta_1 - \frac{C_0}{C_1} \cdot tg \delta_1 \quad (88)$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \quad (89)$$

$$tg \delta = tg \delta_1 \quad (90)$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_1}{C_0} \cdot (1 + tg^2 \delta_1) \quad (91)$$

Ve vztazích (88), (89), (90), (91) je C_0 a $tg \delta_0$ kapacita a ztrátový činitel měřící nádoby se vzduchem a C_1 a $tg \delta_1$ kapacita a ztrátový činitel měřící nádoby naplnění zkoušeným izolačním olejem

5.2 Měření rezistivity při stejnosměrném napětí dle ČSN EN 60247

Pro měření rezistivity používáme stejného zařízení jako u měření ztrátového činitele a permitivity popsaného v kapitole 5.1.1.

5.2.1 Měřící metoda

V této metodě se používá stejnosměrného napětí, které zatíží kapalinu napětovým namáháním 250 V/mm po dobu 60 ± 2 s. Pokud byl před měření rezistivity měřen ztrátový

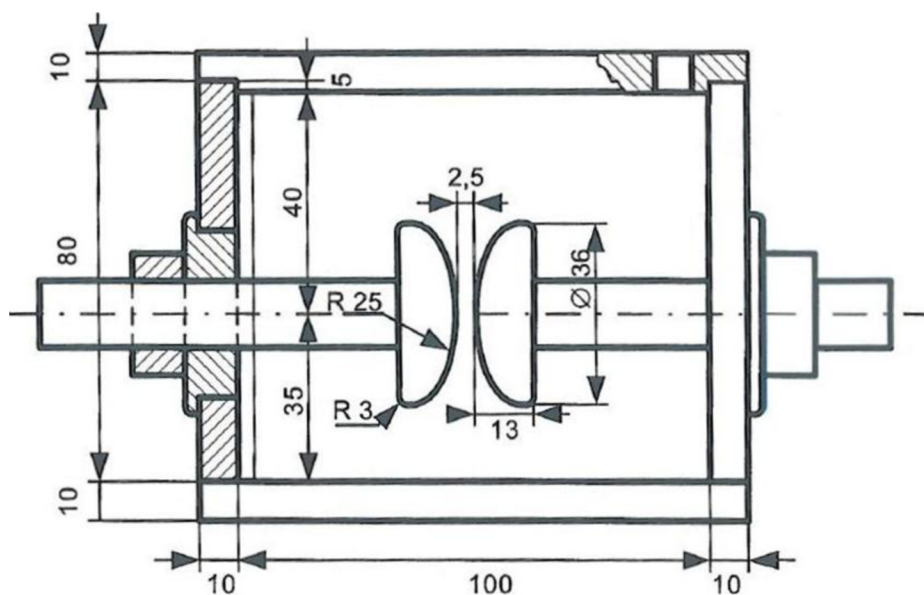
činitel, elektrody by měly být zkratovány po dobu 60 s. Měření rezistivity by mělo následovat hned poté. Při měření v různých teplotách by mělo měření započít po 10 minutách po dosažení požadované teploty v rozmezí ± 1 °C. Vnitřní elektroda se uzení a k vnější je přivedeno napětí. Na konci doby se odečítá proud a napětí. Elektrodotový systém vyprázdníme a naplníme novým vzorkem a celé měření opakujeme. Měření se nesmí lišit o více jak 35 %. Rezistivita se pak počítá ze vztahu:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} \quad (92)$$

kde U je odečtená hodnota zkušební napětí a I hodnota proudu. K je konstanta elektrodotového systému a počítá se „ $K = 0,113 \cdot$ kapacita prázdného elektrodotového systému v pikofaradech“. Udává se v metrech. Hodnota 0,113 je převrácená hodnota permitivity vakua. Dále se používá vztah (35).

5.3 Měření průrazného napětí při síťovém kmitočtu

Pro stanovení elektrické pevnosti a průrazného napětí se provádí přesně definované zkoušky podle normy ČSN EN 60156. Ve zkušební komůrce o objemu 350 až 600 ml jsou umístěny definované semisférické leštěné elektrody. Vzdálenost elektrod je $2,5 \pm 0,05$ mm. Při plnění komůrky olejem je dbát na to, aby se nevytvářely plynové bubliny, které se případně odstraní promícháním. Zkušební elektrodoty jsou zobrazeny na Obr. 14.



Obr. 14: Uspořádání elektrod při měření průrazného napětí kapalných izolantů [19]

Při zkoušce se provádí šest průrazů za sebou v pětiminutových intervalech. Z naměřených hodnot se stanovuje střední hodnota průrazného napětí $\overline{U_p}$, směrodatná odchylka a variační koeficient. Tyto hodnoty se vypočítají podle vztahů (93),(94) a (95):

$$\overline{U_p} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \quad (93)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{U_p} - U_{pi})^2}{n - 1}} \quad (94)$$

$$v = \frac{s}{\overline{U_p}} \cdot 100\% \quad (95)$$

kde U_{pi} je hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů, s je směrodatná odchylka, n je počet jednotlivých průrazů a v je variační koeficient.

Pokud je variační koeficient vyšší než 20 %, měření se opakuje. Pokud hodnota zůstává stejná, kapalina jako izolant nevyhověla.[18]

6 Praktická část

Praktická část se zabývá analyzováním vybraných vzorků elektroizolačních kapalin a stanovením jejich elektrických parametrů. Z elektrických parametrů byly sledovány permitivita, ztrátový činitel, vnitřní rezistivita a průrazné napětí. K měření se využíval analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830 spojený se zkušebním elektroodovým systémem Tettex 2903 certifikovaný metrologickým institutem. Pro stanovení průrazného napětí se použil přístroj BAUR DTA 100C pro měření odolnosti průrazů izolačních olejů. Hodnoty byly měřeny v počátečních podmínkách a byly stanoveny jejich teplotní závislosti. Z naměřených vzorků jednotlivým porovnáním parametrů bylo zvoleno 5 nejlepších vzorků. Pro vybraných 5 vzorků byla následně navrhována zrychlená degradační zkouška tepelným namáháním podle normy ČSN EN 61125. Elektrické parametry byly postupně v průběhu degradační zkoušky monitorovány v jednotlivých časových intervalech. Z naměřených dat byly zhotoveny teplotní a časové závislosti. Jednotlivé výsledky byly matematicky aproximovány a porovnány. Následovala fyzikální interpretace a zhodnocení míry oxidační stability.

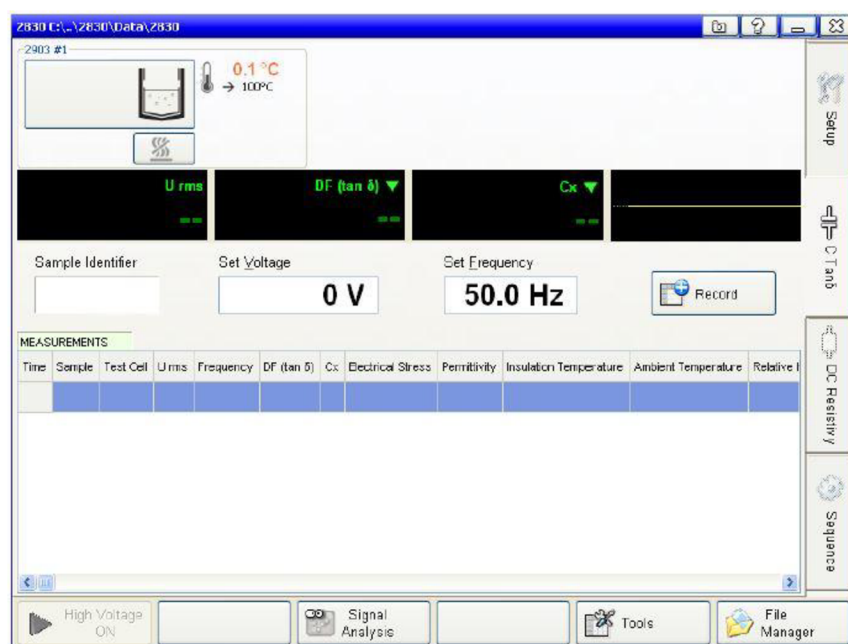
6.1 Použité přístroje

6.1.1 Tettex 2830/2831 analyzátor olejů a pevných dielektrik

K měření ztrátového činitele $tg \delta$, relativní permitivity a rezistivity byl podle normy ČSN EN 60247 zvolen analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830 (na Obr. 15). Je určen k měření tekutých a pevných izolantů s velmi malým ztrátovým činitelem a vysokonapěťových izolačních materiálů. Tettex 2830 při měření C a $tg\delta$ pracuje na principu kombinovaného vectorového můstku. Zařízení dále obsahuje teplotní regulátor, DC a AC napěťové zdroje a měřič stejnosměrného odporu. Měření DC rezistivity je založeno na vestavěném pikoampérmetru. Pomocí vysokonapěťového zdroje se připojí napětí na testovací elektroodový systém tak, aby vzorkem protékal proud, který měří pikoampérmetr. Výsledná rezistivita je pak dána vztahem (92). Měřicí přístroj je plně ovládán vestavěným PC. Systém běží pod operačním systémem Windows Embedded Standard 7, ve kterém je speciální program pro obsluhu. Grafické prostředí (Obr. 16) je intuitivní a nabízí uživateli volit mezi automatickým a manuálním režimem. Naměřená data se standardně ukládají ve formátu .xml. Jedná se o špičkový nástroj naměření těchto veličin a veškeré naměřené hodnoty dosahují vysoké přesnosti. [1]



Obr. 15: Analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830 [1]

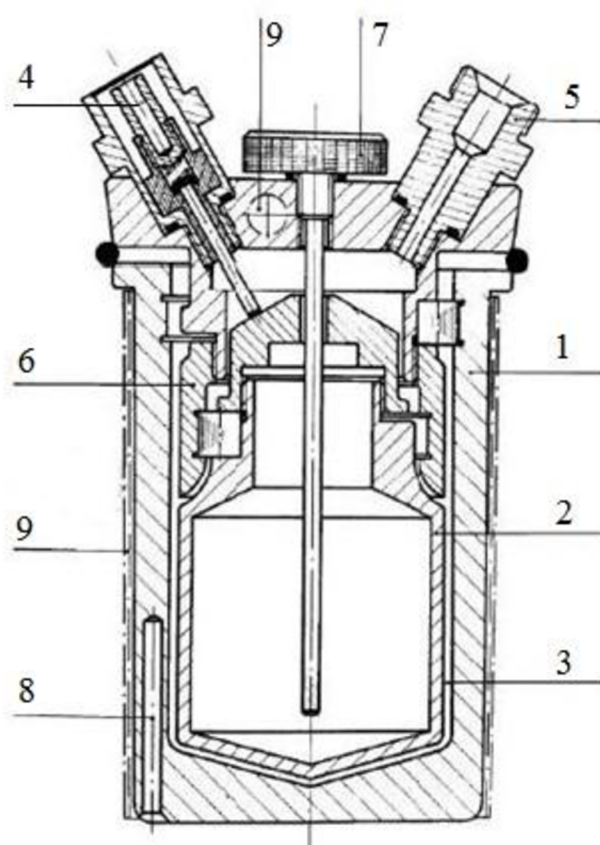


Obr. 16: Uživatelské prostředí analyzátoru Tettex 2830

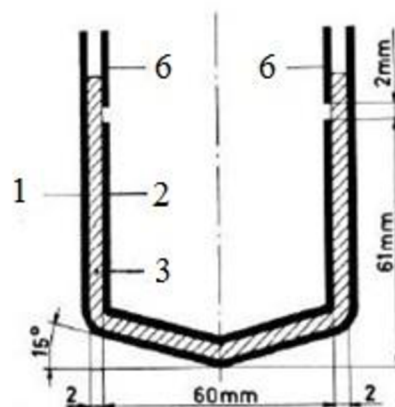
Jako měřicí elektrodový systém byla použita zkušební komora od stejné firmy s označením 2903 (zobrazená na Obr. 17). Komora se skládá z válcového kondenzátoru se stíněnou měřicí elektrodou a ochranným kroužkem pro kapalné materiály, regulátoru teploty a měřiče teploty. Schéma zkušební komory je na Obr. 18.[2] .



Obr. 17: Zkušební komora Tettex 2903 [2]



- 1) napěťová elektroda
- 2) měřicí elektroda
- 3) prostor pro kapalinu
- 4) konektor měřicí elektrody
- 5) vakuový konektor
- 6) ochranný kroužek
- 7) teplotní čidlo
- 8) externí teplotní čidlo
- 9) vytápění



Obr. 18: Schéma zkušební komory Tettex 2903 [2]

6.1.2 Baur DTA 100 C

Přístroj slouží k plně automatickému zkoušení odolnosti izolačních kapalin proti elektrickému průrazu. Je navrhnut tak, aby automaticky prováděl zkoušky elektrického průrazu podle veškerých národních i mezinárodních norem. Rozsah zkušebního napětí je od 0 do 100 kV. Disponuje velmi krátkou vypínací dobou ($< 10 \mu\text{s}$). Naměřené výsledky jsou velmi spolehlivé a reprodukovatelné. Princip spočívá ve velmi přesném měření zkušebního napětí přímo ve vysokonapěťové části přístroje a permanentním sledování nárůstu napětí. Obsahuje nádobku o objemu 400 ml se semisférickými elektrodami. S elektrodami lze manuálně manipulovat a měnit jejich vzdálenost. Součástí je i magnetické míchání, které zaručuje rozptýlení a zánik přítomných bublin. Výsledky jsou k dispozici v elektronickém protokolu, který lze pomocí přítomné tiskárny vytisknout. Přístroj v sobě obsahuje data z různých národních i mezinárodních norem a umožňuje tak velmi rychlé nastavení parametrů. V této diplomové práci byla využita norma ČSN EN 60156.[9]



Obr. 19: Baur DTA 100C [9]

6.2 Použité kapaliny

K experimentu bylo použito 11 vzorků. Z toho 7 vzorků jsou zástupci rostlinných olejů, 2 vzorky jsou vyšší mastné kyseliny, 1 vzorek je metylester oleje řepkového a 1 vzorek je minerální olej. Minerální olej je díky svým výborným elektroizolačním vlastnostem měřen jako referenční vzorek pro porovnání naměřených hodnot a charakteristik s rostlinnými oleji. Níže je uveden stručný popis použitých vzorků.

6.2.1 Minerální olej

TRAFO-CZA

TRAFO CZ-A je inhibovaný olej používající se v transformátorech. Primárně se užívá jako izolační a chladičí kapalina transformátorů, strojů nejvyšších napětí a výkon i strojů

přetěžovaných. Použit lze však i do stykačů, kondenzátorů a spínačů. Vyrábí se z jakostního hydrokrakovaného hluboce rafinovaného základového oleje, získaného z parafinické ropy. Obsahuje inhibitor oxidace. Má nízkou hustotu, velmi dobré elektroizolační vlastnosti, vynikající oxidační stabilitu a dlouhou životnost. Bod vzplanutí je 175 °C. Díky vynikajícím elektroizolačním vlastnostem je tento vzorek zvolen jako referenční a poslouží k porovnání s vybranými alternativními kapalinami.[21]

6.2.2 Rostlinné oleje

FRITO Slunečnicový olej

Jedná se o slunečnicový olej firmy Fabio vyráběný ze speciální odrůdy slunečnice HOSO. Výsledný slunečnicový olej je s vysokým obsahem kyseliny olejové. Zastoupení mastných kyselin představuje: 83 – 85% kyseliny olejové, 5 % kyseliny stearové, 5 % kyseliny linolové a 4 % kyseliny palmitové. Vyznačuje se vysokou teplotní stabilitou. Bod vzplanutí oleje se pohybuje v rozmezí 220 – 235 °C.

Kukuřičný olej

Jedná se o laboratorně čistý vzorek od firmy Sigma Aldrich, který se používá jako kvalitativní standart kukuřičného oleje (například pro použití v chromatografii). Přesné složení výrobce neudává. Obecné složení kukuřičných olejů je v poměru 55 – 60 % kyseliny linolové, 25 – 30 % kyseliny olejové, 8 – 11 % kyseliny palmitové a 1 – 3% kyseliny stearové. Disponuje vysokým bodem vzplanutí (254 °C).

MEŘO – metylester řepkového oleje

Nejedná se přímo o rostlinný olej, ale produkt z něho vyrobený. Vyrábí se rafinačním procesem nazývaným esterifikace. Při esterifikaci se mísí metanol s hydroxidem sodným a s řepkovým olejem. Hlavní využití MEŘO je jako biopalivo do vznětových motorů a jako komponenta do minerální nafty. Skládá ze z 98 % metylesterů masných kyselin řepkového oleje, z 1 % směsí mono-, di a triglyceridů, z 0,3 % volných mastných kyselin, z 0,3 % metanolu. Zbytek tvoří volný glycerol a nezmýdelnitelné látky. Bod vzplanutí se pohybuje kolem 130 °C. MEŘO byl dodán firmou Fabio.

Řepkový rafinovaný olej

Byl použit od firmy Fabio. Je vyráběn lisováním za studena a následně rafinován bez použití chemických přísad. Zastoupení mastných kyselin představuje: 56 % kyseliny olejové, 20 % kyseliny linolové, 11 % kyseliny linolenové, 4,5 % kyseliny palmitové a 1,5 % kyseliny stearové. Díky vyššímu obsahu nenasycených mastných kyselin má vysokou tepelnou stabilitu. Bod vzplanutí se pohybuje v rozmezí 190 – 200 °C.

Řepkový nerafinovaný olej

Je to surový olej od firmy Fabio. Vyrábí se lisování za studena. Složení mastných kyselin je stejné jako u řepkového rafinovaného oleje. Oproti rafinovanému oleji má lehce tmavší barvu a jsou v něm přítomné neodfiltrované mikročástice zbytků z lisování. Bod vzplanutí se pohybuje mezi 150 – 180 °C.

Rýžový olej

Vyrábí se extrakcí z částí rýžových otrub. Jde o olej od firmy Suriny. Zastoupení mastných kyselin představuje: 45 % olejové kyseliny, 30 % linolové kyseliny, 19 % palmitové kyseliny a 2 % stearové kyseliny. Olej se vyznačuje vysokou teplotní stabilitou. Výrobní proces se skládá z mletí rýže, která je čištěná přes filtr. Poté následuje sušení k eliminaci vlhkosti a extrakce. Extrakce probíhá s minimálním použitím přidaných chemikálií. Následuje rafinace, která zaručí oleji dobré vlastnosti a oxidační stabilitu. Bod vzplanutí oleje je 215 °C.

Slunečnicový rafinovaný olej

Získává se lisováním semen slunečnice. Olej je rafinován a winterizován, což je proces při kterém se odstraňují přírodní vosky. Zastoupení mastných kyselin představuje: 63 % kyseliny linolové, 23 % kyseliny olejové, 6,5 % kyseliny palmitové, 5 % kyseliny stearové a 0,5 % kyseliny linolenové. Bod vzplanutí oleje se pohybuje v rozmezí 140 – 150 °C. Byl použit olej od firmy Fabio.

Sojový surový olej

Vyrábí se lisováním sojových bobů. Zastoupení mastných kyselin představuje: 48 – 59 % linolové kyseliny, 17 – 30 % olejové kyseliny, 8 – 14 % palmitové kyseliny, 4 – 11 % linolenové kyseliny a 2 – 6 % kyseliny stearové. Bod vzplanutí se pohybuje mezi 120 – 140°C. Byl použit olej od firmy Fabio.

6.2.3 Vyšší mastné kyseliny

Z vyšších mastných kyselin byly vybrány kyseliny s největším výskytem ve vybraných rostlinných olejích.

Kyselina olejová

Je to karboxylová kyselina, která patří do mastných kyselin. Je součástí rostlinných olejů. Její racionální vzorec je $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$. Bod vzplanutí je udáván na 113 °C a počáteční bod varu v rozmezí 194 – 195 °C. Použitý vzorek byl od firmy Sigma Aldrich.

Kyselina linolová

Je to nenasycená vyšší mastná kyselina. Její racionální vzorec je $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$. Vyskytuje se v rostlinných olejích. Bod varu je udáván kolem 228 °C. Použitý vzorek byl od firmy Sigma Aldrich.[27]

6.3 Postup měření

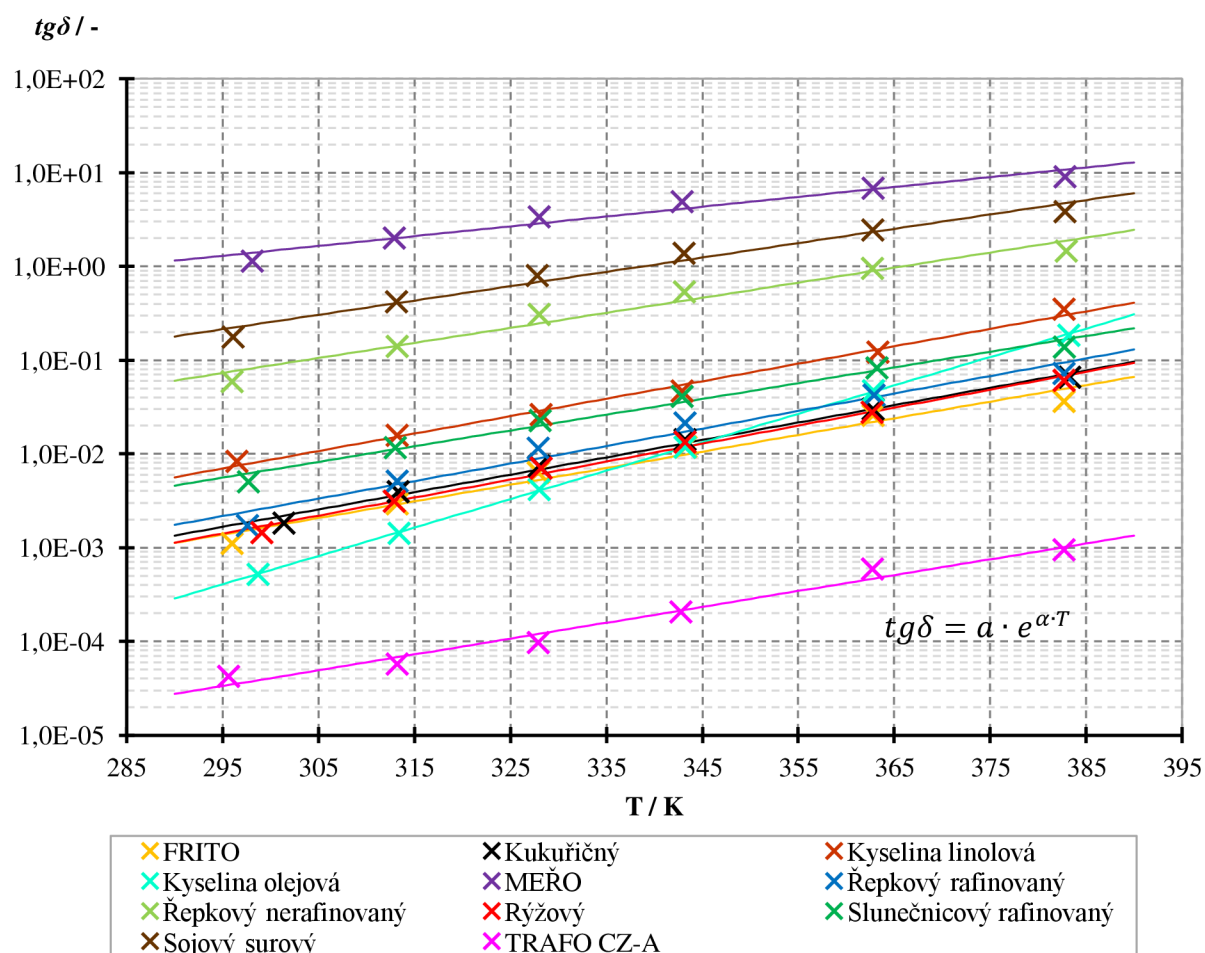
Pro měření ztrátového činitele, permitivity a rezistivity bylo zhotoveno měřicí pracoviště skládající se z analyzátoru Tettex 2830 a zkušební komory 2903. Postup měření byl prováděn dle normy ČSN EN 60247. Cílem bylo stanovit teplotní závislosti uvedených parametrů. Dané parametry byly měřeny při 25 °C (teplota okolí), 40 °C, 55 °C, 70 °C, 90 °C a 110 °C. Před začátkem měření se změnila kapacita prázdného elektrodového systému se vzduchem při střídavém napětí 500 V. Naměřená hodnota kapacity se zadávala do analyzátoru, kde sloužila k výpočtu permitivity. Pro měření vzorků bylo použito 40 ml kapaliny. Po změření kapacity vzduchu se musel elektrodový systém vyjmout z komory a naplnit kapalinou. Veškerá manipulace s elektrodovým systémem, kádinkou a kapalinami byla prováděna v latexových rukavicích. Při naplňování elektrodového systému kapalinou bylo dbáno nejen na čistotu ale i na minimalizaci tvorby bublinek v kapalině. Po naplnění se elektrodový systém umístil zpátky do komory a započalo měření. Při dosáhnutí nastavené teploty se z důvodu její stabilizace čekalo 10 minut. Tolerance teploty byla stanovena na $\pm 0,5$ °C. Po dosáhnutí a stabilizaci teploty byl zapnut zdroj střídavého napětí o frekvenci 50 Hz a napětí 500 V. Hodnoty ztrátového činitele a permitivity se zaznamenaly až po jejich ustálení. Pro ověření reprodukovatelnosti výsledků a pro stanovení střední hodnoty měření byly parametry měřeny třikrát. Pro měření rezistivity při stejnosměrném napětí bylo třeba vzorek po dobu jedné minuty vybijet, následně připojením stejnosměrného zdroje o napětí 500 V započalo nabíjení, při kterém se měřil proud protékající vzorkem. Konvenční doba nabíjení je 1 minuta. Na displeji byla rovnou zobrazována vypočtená hodnota rezistivity. Po dokončení AC a DC měření se nastavila další požadovaná teplota a opakovat se celý postup měření. Všechna naměřená data se ukládala ve vestavném počítači ve formě „.xml“ souboru. Po ukončení měření bylo nutné nechat elektrodový systém se vzorkem ochladit na pokojovou teplotu. Následovalo čištění elektrodového systému, které bylo prováděno dle pokynů v normě ČSN EN 60247. Jednalo se o rozebrání elektrodového systému, opláchnutí acetonem, horkou vodou a destilovanou vodou. Poté následovalo sušení při teplotě 110 °C v horkovzdušné komoře Stericell po dobu 1 – 2 hodin.

Pro měření průrazného napětí byl použit přístroj Baur DTA 100C. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN 60156. Postup měření probíhal nastavením parametrů podle příslušné normy (uživatel pouze vybral normu, podle které měřil, parametry již Baur DTA 100C obsahuje). Následovalo nastavení vzdálenosti elektrod. Pro ověření bylo možné použít přiložený etalon vzdálenosti (2,5 mm). Do nádoby se vložilo magnetické míchátko a nalila kapalina. Množství kapaliny se pohybovalo kolem 375 ml tak, aby zakryla semisférické elektrody. Po nastavení následovalo automatické měření podle kapitoly 5.3. Pro další kapalinu bylo nutné nádobku i s elektrodami očistit dle normy (to zahrnovalo čištění acetonem a

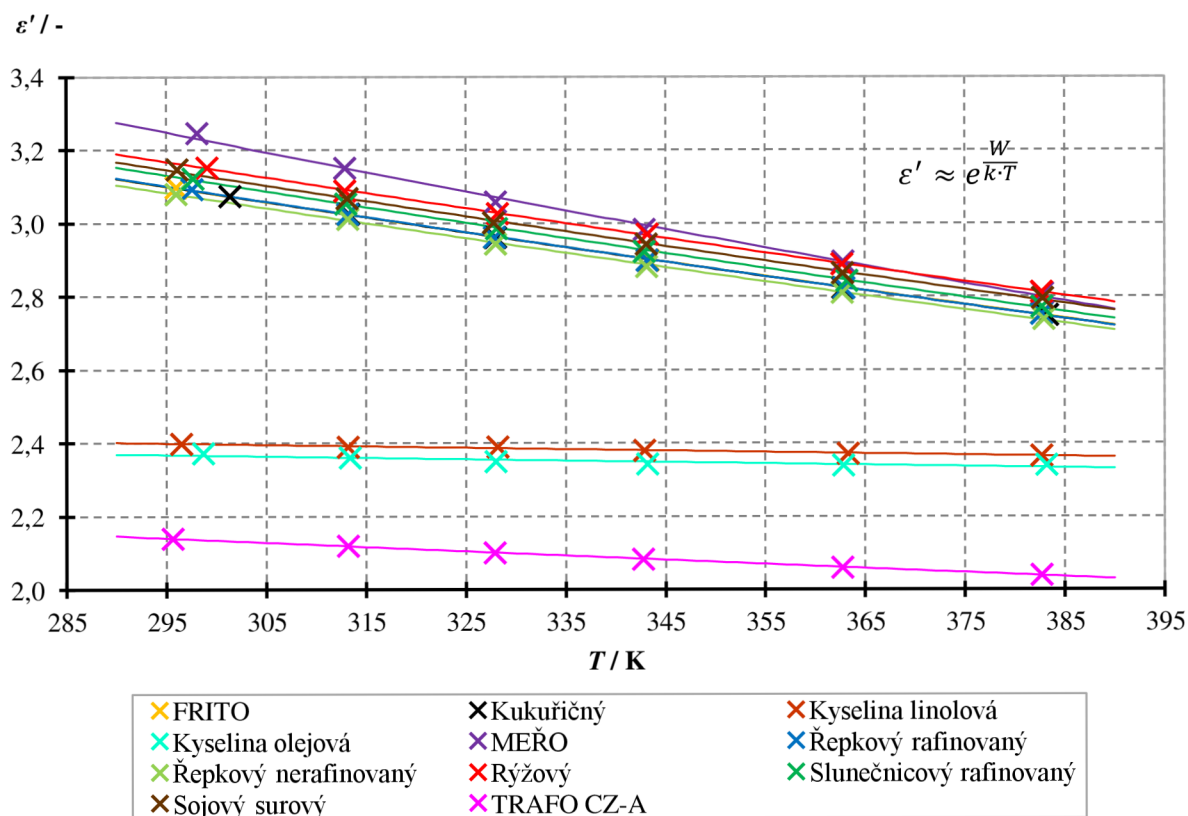
opláchnutí destilovanou vodou a následným sušením při teplotě 40 °C). Pro eliminaci nečistot bylo s nádobkou i elektrodami zacházeno v latexových rukavicích.

6.4 Naměřené hodnoty a grafy počátečních hodnot

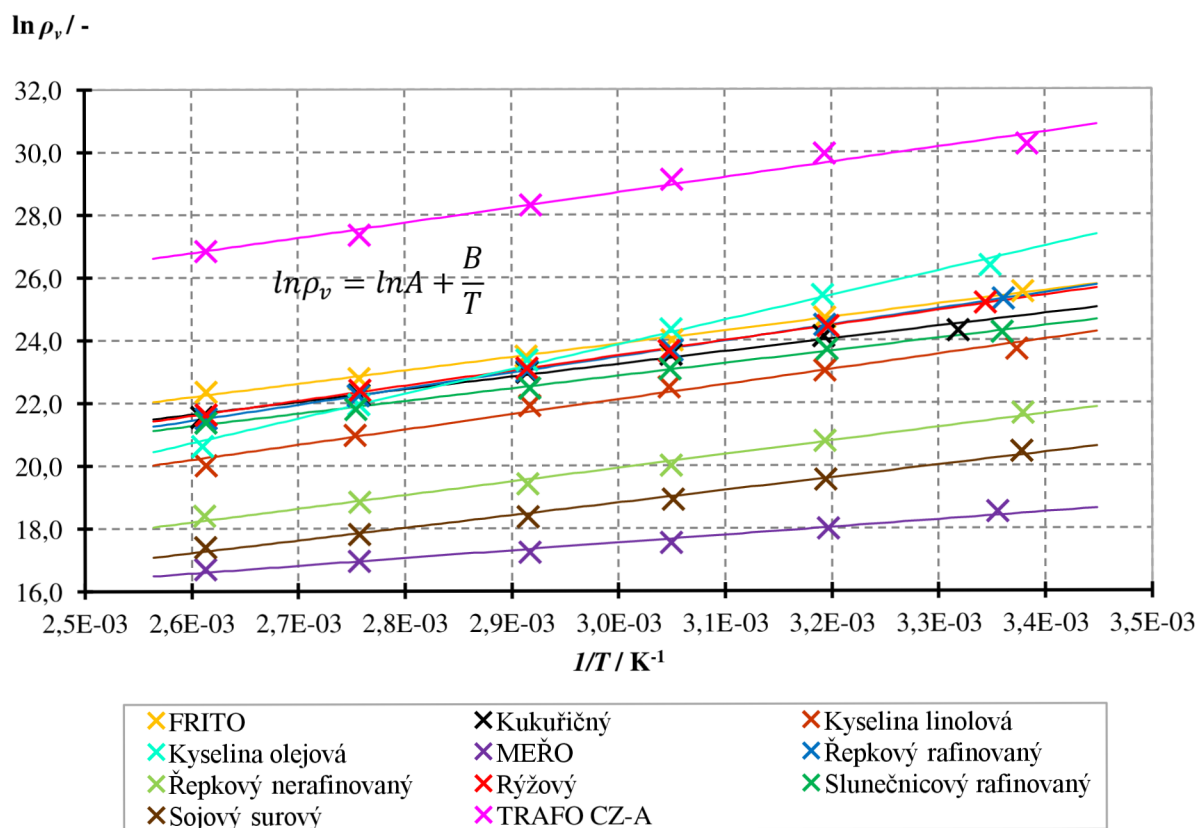
V první řadě se stanovily počáteční hodnoty uvedených vzorků. Cílem bylo změřit jejich teplotní závislosti. Z naměřených hodnot se následně zvolí vhodní kandidáti pro zrychlenou degradační zkoušku. Původně měl experiment zahrnovat i napěťové závislosti. Z důvodu malých změn dielektrických parametrů v závislosti na přiloženém elektrickém poli bylo od napěťových závislostí upuštěno (největší vliv elektrického pole byl na ztrátový činitel, pro příklad je v příloze na digitálním médiu zobrazena napěťová závislost dielektrických parametrů oleje TRAFO–CZA). Experiment byl omezený vestavěným zdrojem a měl by smysl při použití vyšších napětí. Měření bylo provedeno dle postupu v kapitole 6.3. Průběhy byly aproximovány pomocí uvedených funkcí v grafech. Výpočty aproximovaných průběhů jsou uvedeny v kapitole 6.7. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **Příloha 1** a grafy jsou uvedeny níže.



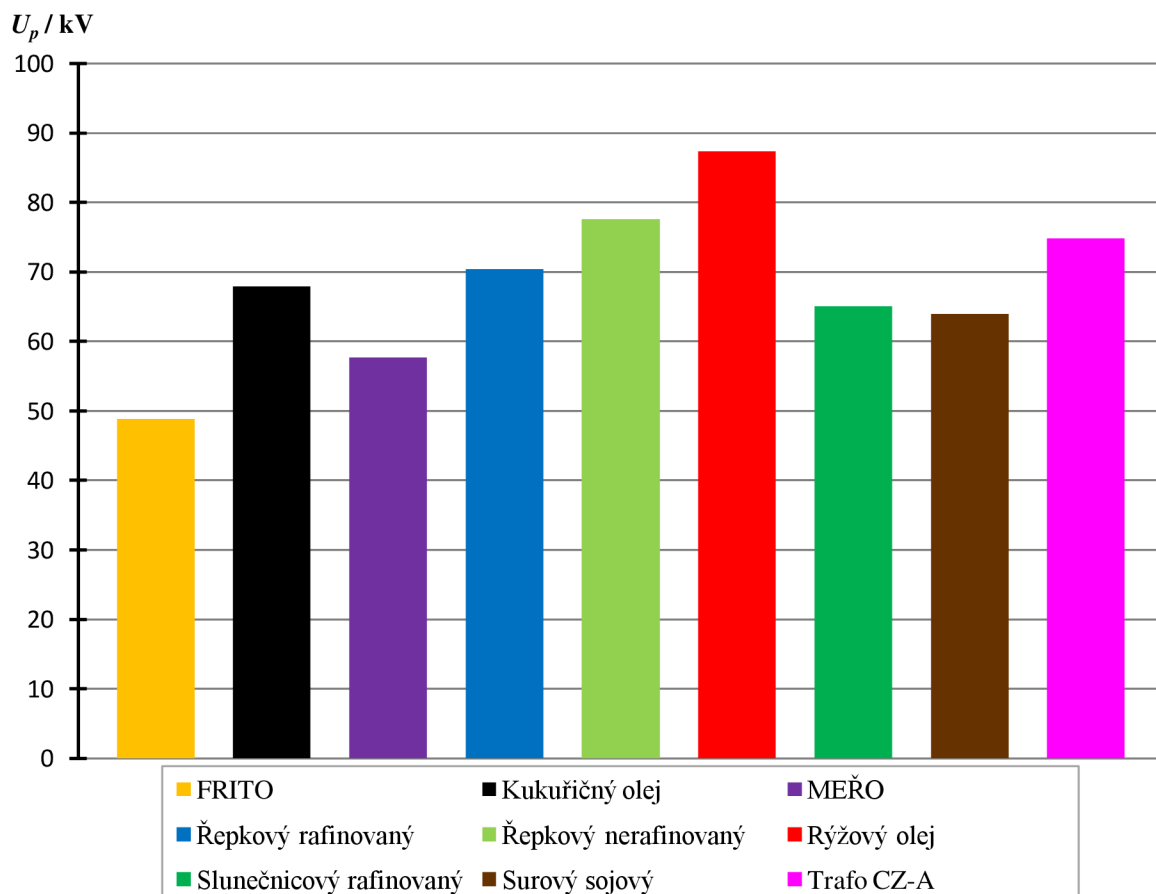
Obr. 20: Teplotní závislost ztrátových činitelů olejů v počátečním stavu



Obr. 21: Teplotní závislost relativních permitivit ϵ' olejů v počátečním stavu



Obr. 22: Závislost logaritmu vnitřních rezistivit ρ_v olejů na převrácené hodnotě teploty v počátečním stavu



Obr. 23: Střední hodnoty průrazných napětí olejů v počátečním stavu

Z naměřených počátečních hodnot bylo vybráno 5 nejvhodnějších kandidátů pro zrychlenou degrační zkoušku. Za referenční vzorek, se kterým se budou srovnávat rostlinné oleje, se považuje TRAFO-CZA. Má vynikající ztrátový činitel (řádově 10^{-5}), nízkou hodnotu permitivity (kolem 2), vysokou rezistivitu a je tak vhodným zástupcem elektroizolačních kapalin. Z rostlinných olejů dosáhly nejlepších dielektrických parametrů vzorky: FRITO, kukuřičný olej, řepkový rafinovaný olej, slunečnicový rafinovaný olej, rýžový olej, kyselina olejová a kyselina linolová. Kvůli nedostatečnému potřebnému množství kapaliny (500 ml) pro degrační zkoušku a velmi vysoké pořizovací ceně se vyřadil kukuřičný olej, kyselina olejová a kyselina linolová. Pro degrační zkoušku byl vybrán olej FRITO, řepkový rafinovaný olej, slunečnicový rafinovaný olej a rýžový olej. Jsou to oleje vyráběné z běžně dostupných plodin, což je činí vhodnými kandidáty.

6.5 Návrh a realizace zrychlené degrační zkoušky

Pro posouzení kvality a spolehlivosti elektroizolační kapaliny je vhodné znát její dlouhodobé chování. Z tohoto důvodu se provádějí zrychlené degrační zkoušky. V dnešní době jsou parametry olejů stejné a tyto zkoušky nám dávají jedinečnou možnost posoudit vhodnost oleje pro daný stroj nebo zařízení.

Zrychlené degradační zkoušky se provádí stykem kapaliny se vzduchem nebo kyslíkem, přítomností katalyzátorů zejména kovů (železo, měď), zvýšenou teplotou a přítomností elektrického pole. Jednotlivé zkoušky se mezi sebou můžou lišit intenzitou a dobou působení, různými kombinacemi atd. U zkoušek se vyhodnocují parametry zmíněné v kapitole 3. V současné době je mnoho metodik (norem) popisujících zrychlené degradační zkoušky. Jejich seznam a popis hlavních působících faktorů je uveden v Tab. 11.[33]

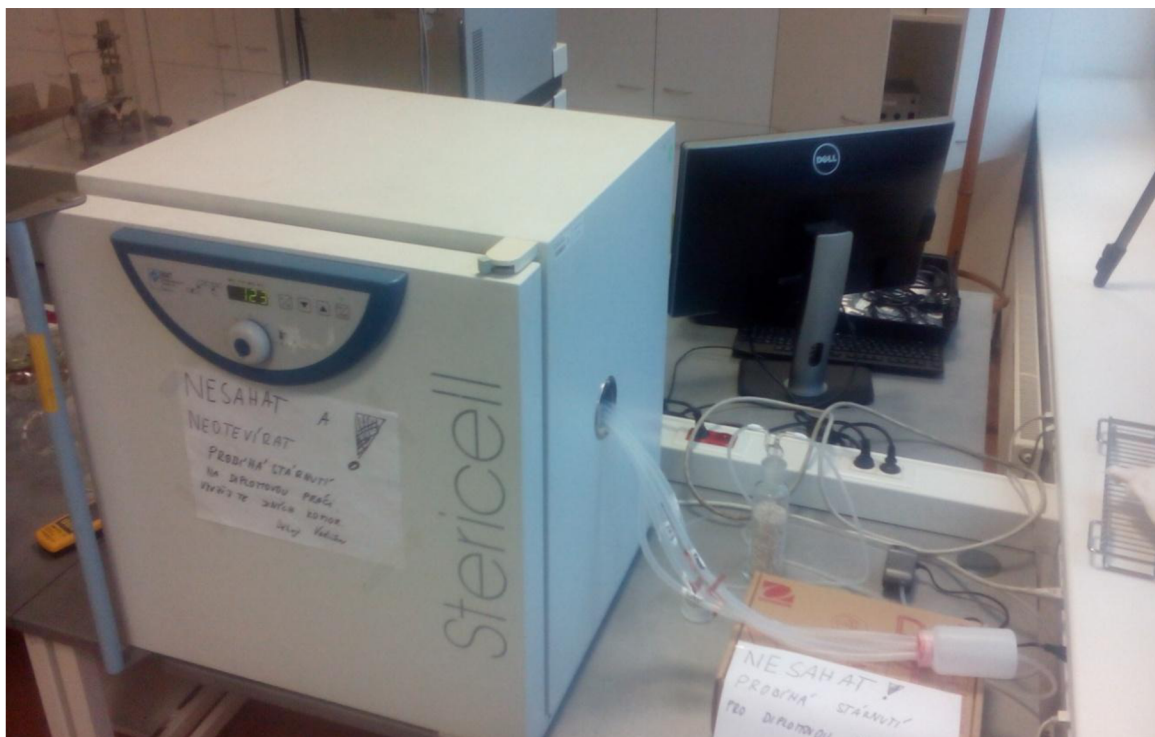
Tab. 11: Metody zrychlených zkoušek stárnutí [33]

Norma	Doba zkoušky (h)	Teplota (°C)	Katalyzátory	
			Měď (cm ² / kg oleje)	Oxidant [litr/hod]
IEC 1125, metoda A	164	100	388	Kyslík-1
IEC 1125, metoda B	Do dosažení těkavé acidity 0,28 mgKOH/g	120	1144	Kyslík-1
IEC 1125, metoda C	164	120	1144	Vzduch-0,15
DIN 51554 (Baader)	140	110	344	Styk se vzduchem
ASTM D1934, metoda A	96	115	-	Styk se vzduchem
ASTM D1934, metoda B	96	115	57	Styk se vzduchem
ASTM D2440	72 (164)	110	376	Kyslík-1

Vlastní návrh a provedení zrychlené degradační zkoušky se řídilo normou ČSN EN 61125, která vychází z normy IEC 1125. Týká se zkušebních metod na vyhodnocování oxidační stálosti nových izolačních kapalin na bázi uhlovodíků. Princip normy spočívá v probublávání proudu kyslíku nebo vzduchu zkoušeným vzorkem při teplotě 100 nebo 120 °C. Norma stanovuje 3 metody provedení. Návrh byl proveden pro metodu C, která

popisuje vyhodnocování oxidační stálosti nových neinhibovaných a inhibovaných uhlovodíkových izolačních kapalin, bez ohledu na přítomnost antioxidačních přísad. Norma vyhodnocuje odolnost vůči oxidaci z množství celkového kalu a z celkové vyvinuté kyselosti nebo z času potřebného k vytvoření daného množství těkavé kyselosti. Pro zrychlenou degradační zkoušku byl z normy převzatý pouze způsob namáhání, nikoli způsob vyhodnocování. Princip metody C je v udržování vzorku kapaliny na teplotě 120 °C za přítomnosti tuhého měděného katalyzátoru při současném probublávání proudem vzduchu. Rychlost průtoku vzduchu je stanovena na 0,15 l/h \pm 0,015 l/h. Interval působící teploty je 120 °C \pm 0,5 °C. Jako katalyzátor se použije tuhá měď ve formě drátu z měkké elektrolytické mědi. Délka měděného drátu by měla být úměrná k získání povrchové plochy 28,6 cm² \pm 0,3 cm² na 25 g \pm 0,1 g oleje. Drát se stáčí do spirály.[6]

K realizaci zrychlené degradační zkoušky byla použita horkovzdušná komora Stericell, promývací baňky o objemu 500 ml, vzduchovací motorek JK-AP1500, digitální průtokoměr Omega FMA 5400/5500 a silikonové hadice. Realizace zrychlené degradační zkoušky je zobrazena na Obr. 24.



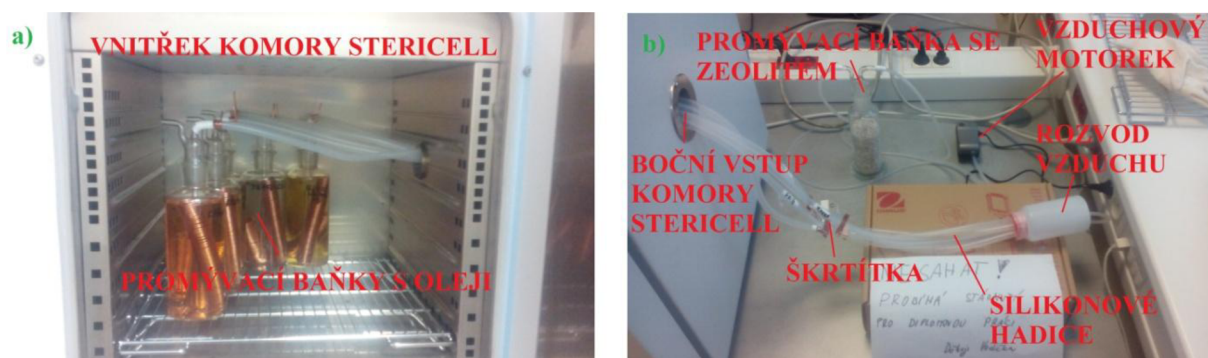
Obr. 24: Realizace degradační zkoušky

Byly použity 500 ml promývací baňky a měděný drát o průřezu 4 mm². Přesná délka drátu se dopočítala pomocí hustoty daného oleje a vztahu pro výpočet plochy válce. Před vložením drátu do promývacích baněk byl zbaven veškerých nečistot. Zhotovené promývací baňky naplněné oleji a měděným drátem jsou na Obr. 25.



Obr. 25: Promývací baňky naplněné oleji a měděným drátem, zleva: řepkový olej, slunečnicový olej, TRAFICO-CZA, FRITO a rýžový olej.

Přívod vzduchu byl zajištěn vzduchovacím motorkem JK-AP1500 (výkon 2 W, průtok 90 l/h). Vzduch byl veden z motorku do promývací baňky se zeolitem, která vzduch dehydrovala. Suchý vzduch byl dále veden do vyrobeného rozvodu, který ho rozváděl pomocí silikonových hadic do promývacích baněk s oleji. Průtok vzduchu byl regulován škrtkou a přesné hodnoty průtoku byly ověřeny digitálním průtokoměrem Omega FMA 5400/5500. Silikonové hadice byly zvoleny z důvodu vysokých provozních teplot. Utěsnění hadic bylo provedeno teflonovou páskou a kovovými škrtkami. Vyhřívání bylo zajištěno horkovzdušnou komorou Stericell, která byla nastavena na teplotu 120 °C a požadovanou délku vyhřívání. Detail degrační soustavy je na Obr. 26.

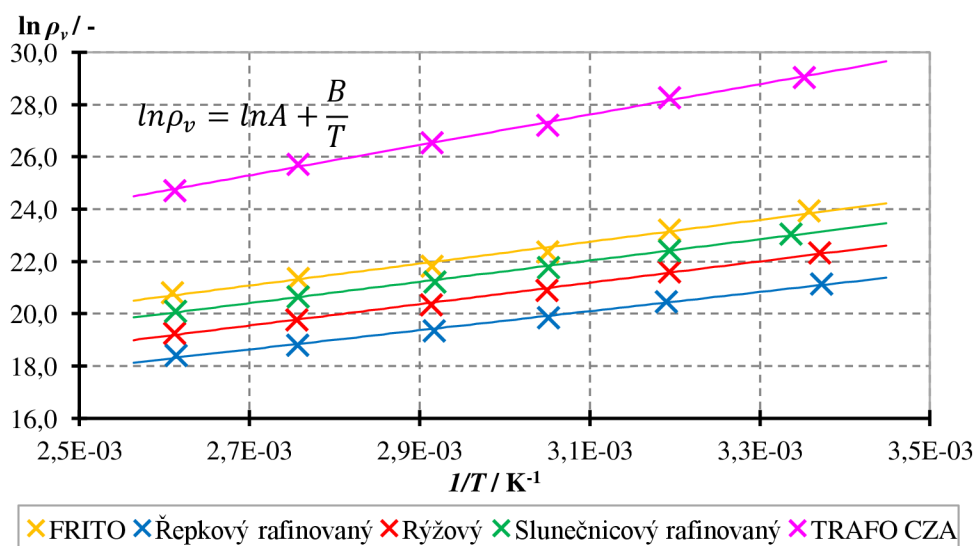
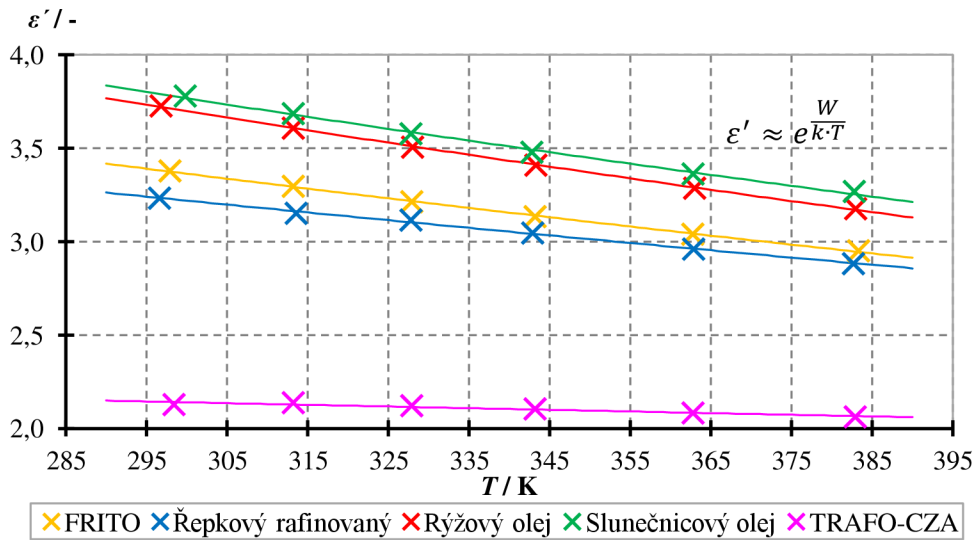
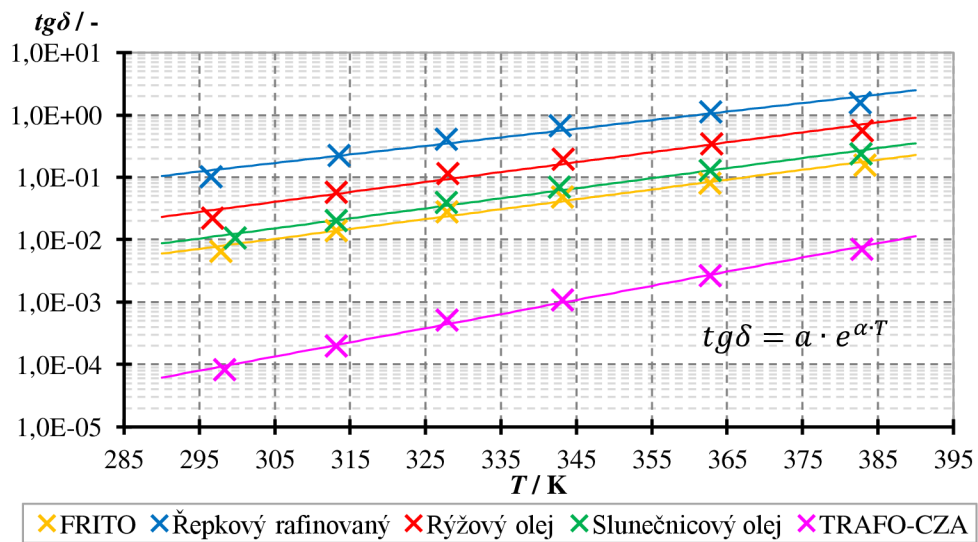


Obr. 26: Detail degrační soustavy

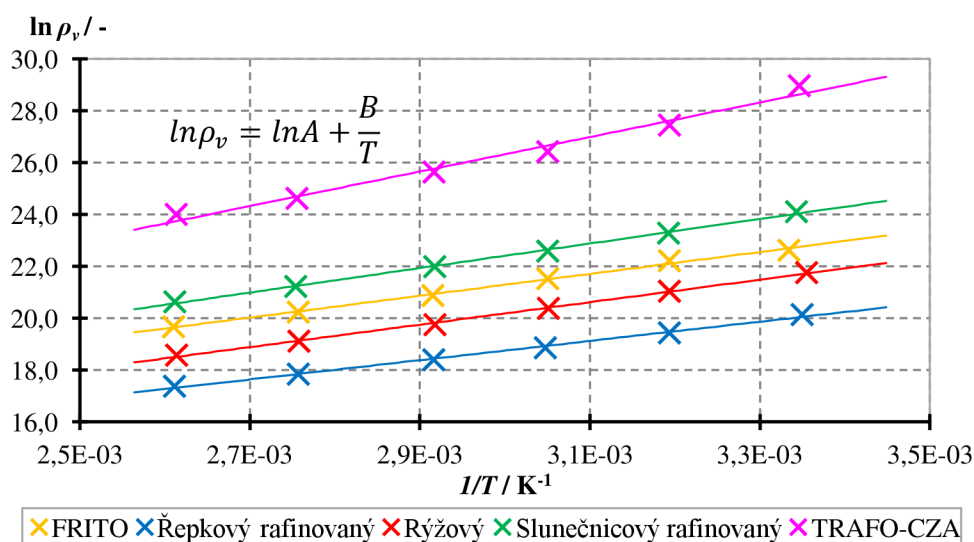
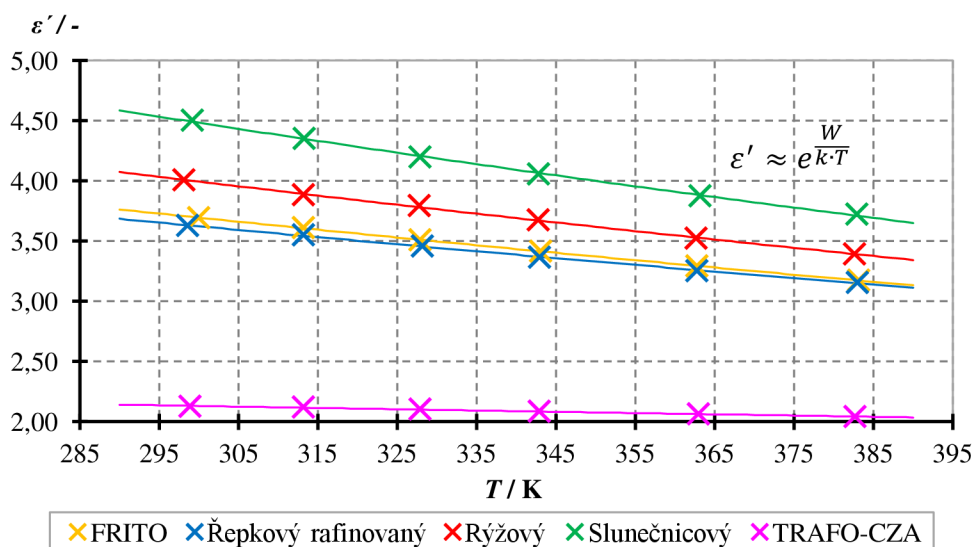
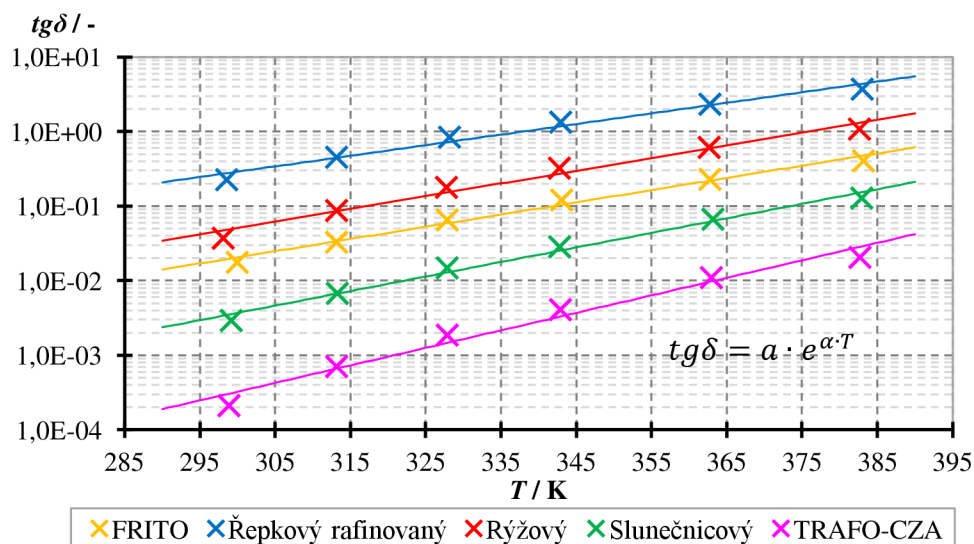
Degrační zkouška byla stanovena na délku 500 h. Vzorke kapalin se odebíraly po 40 ml v intervalu 100, 250 a 500 h. Pro každý vzorek po daném intervalu namáhání se naměřily jeho dielektrické parametry podle kapitoly 6.3. Průrazné napětí bylo naměřeno až pro konečné degradované vzorky (500 h), z důvodu množství potřebné kapaliny pro měření. Průběh celé zkoušky se kontroloval a v případě potřeby upravoval (zvýšením viskozity některých vzorků se musel regulovat průtok vzduchu).

6.6 Naměřené hodnoty a grafy v průběhu degrační zkoušky

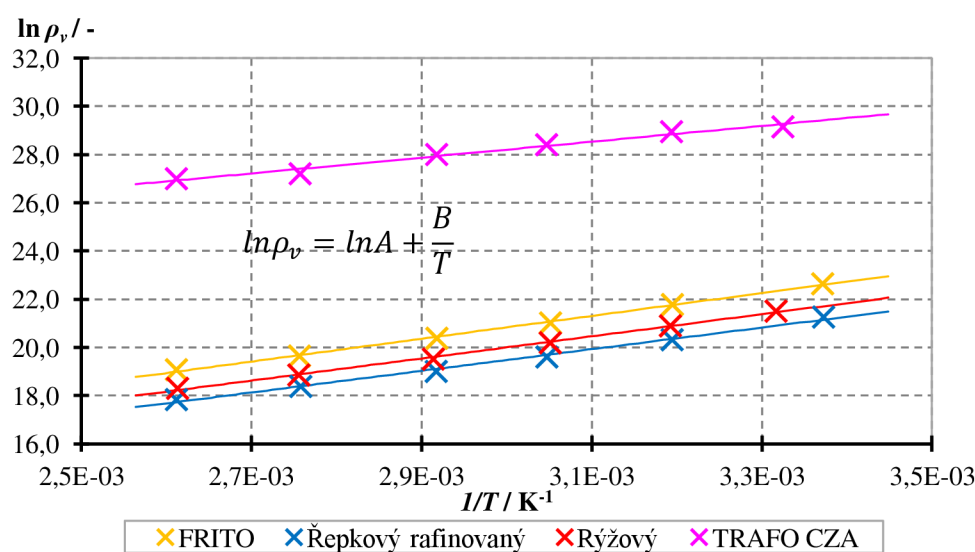
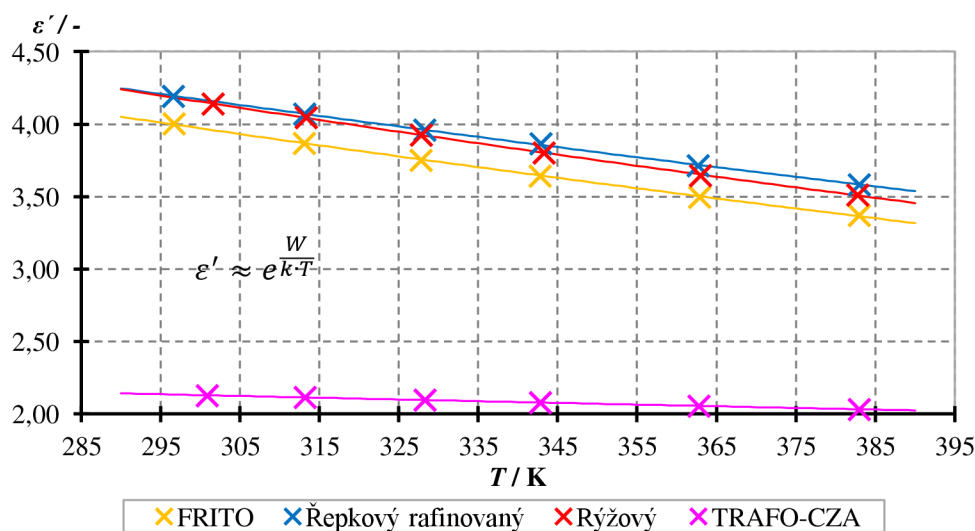
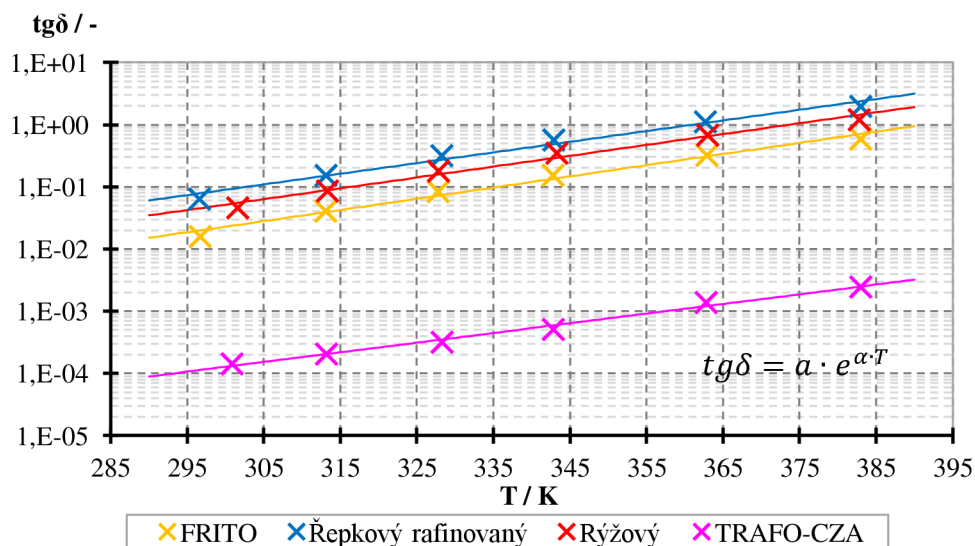
Všechny naměřené hodnoty byly zpracovány tabelárně jsou zobrazeny v tabulkách v **Příloha 2**. U naměřených vzorků byly stanoveny teplotní závislosti $\operatorname{tg}\delta = F(T)$, $\varepsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$, a časové závislosti jednotlivých dielektrických parametrů v průběhu degrační zkoušky. Hodnoty slunečnicového oleje pro 500 h nejsou uvedeny, protože vzorek zpolymeroval a nebylo možné ho použít (více v kapitole 6.8). Naměřené hodnoty byly aproximovány přiloženými matematickými funkcemi. Jednotlivé koeficienty funkcí vč. koeficientů determinace jsou uvedeny v **Příloha 3** nebo na přiloženém digitálním médiu. Na konci této kapitoly je uvedena tabulka, ve které jsou srovnány průběžné hodnoty dielektrických parametrů podle délky namáhání pro pokojovou teplotu ($\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$) a $90\text{ }^\circ\text{C}$ (jedná se o nejvyšší udávanou provozní teplotu transformátorů). Časové průběhy dielektrických parametrů aproximovány nebyly. Experiment se skládá z více-faktorového namáhání (teplota, vzduch) a náhradní matematická funkce je velice komplikovaná a problematická, nad rámec zadání diplomové práce. Pro přehlednost zobrazení jsou grafy uvedeny na další straně.



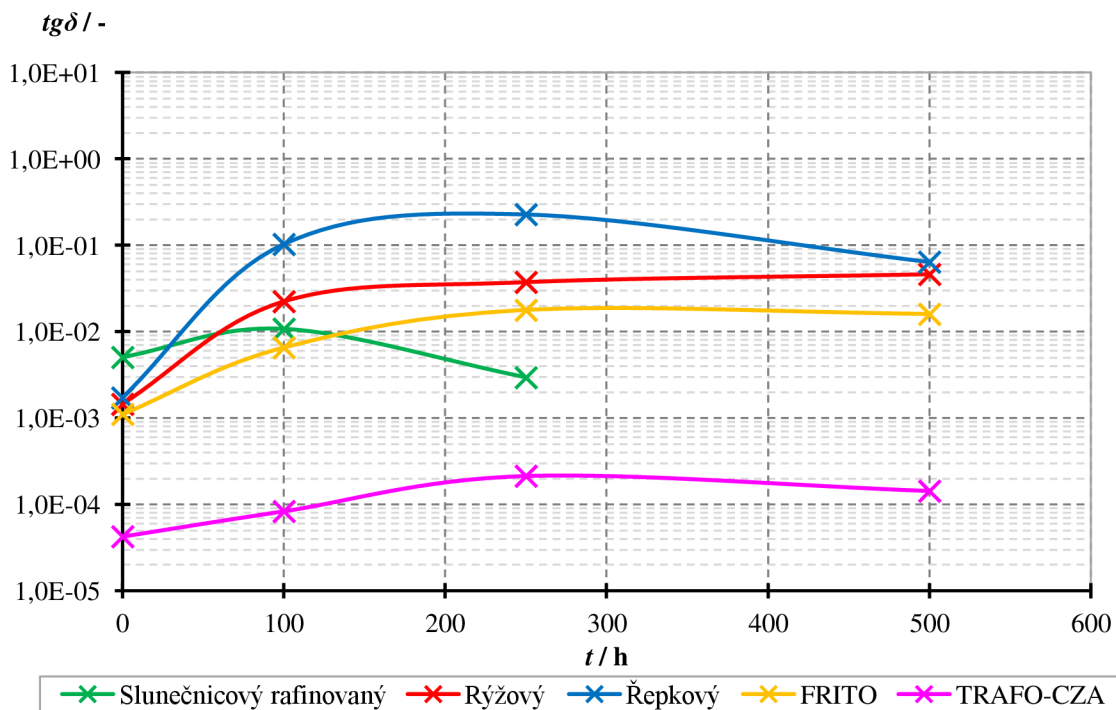
Obr. 27: Naměřené závislosti $tg\delta = F(T)$, $\epsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$ olejů po 100 h dlouhém namáhání



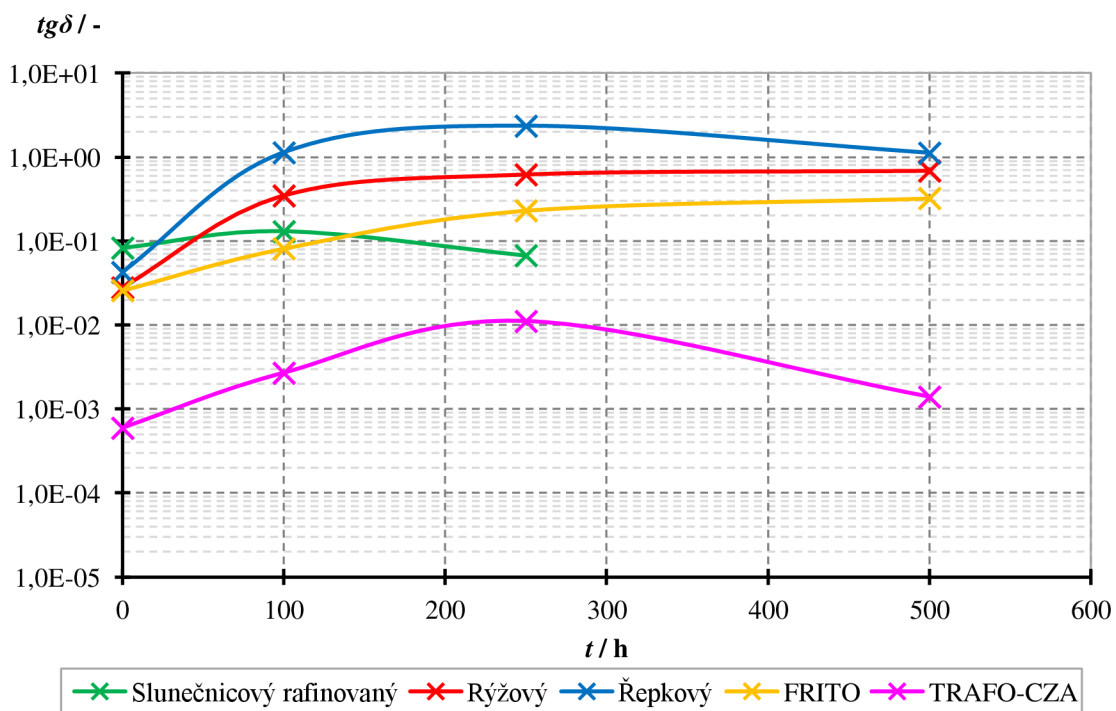
Obr. 28: Naměřené závislosti $tg\delta = F(T)$, $\epsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$ olejů po 250 h dlouhém namáhání



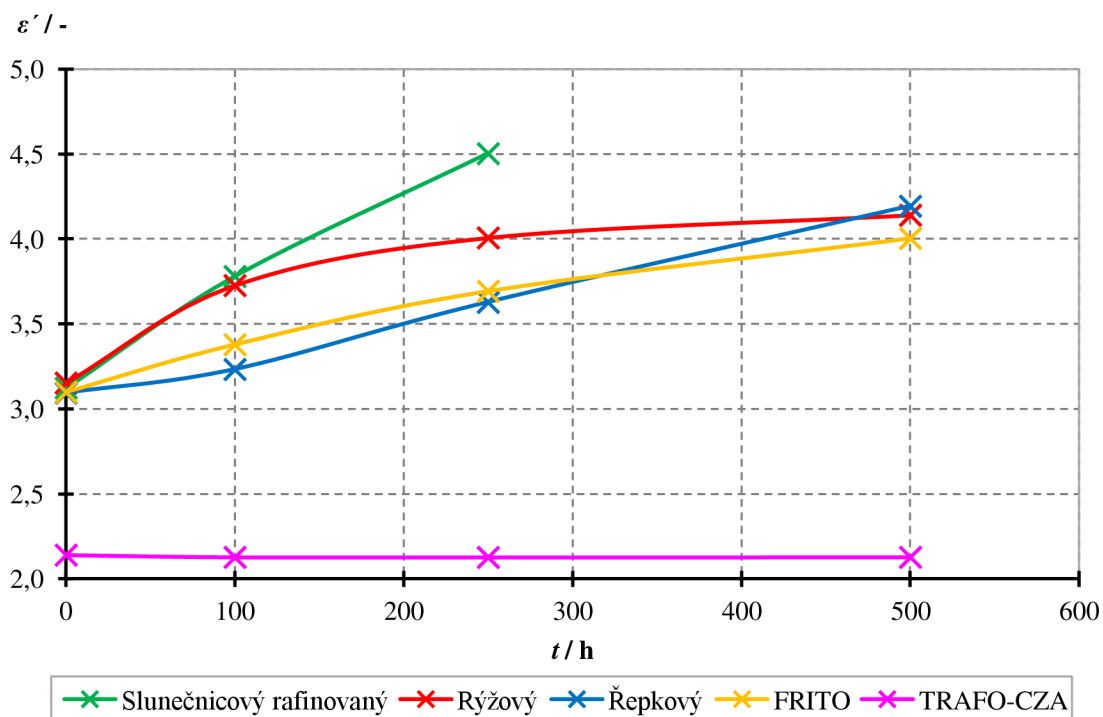
Obr. 29: Naměřené závislosti $tg\delta = F(T)$, $\epsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$ olejů po 500 h dlouhém namáhání



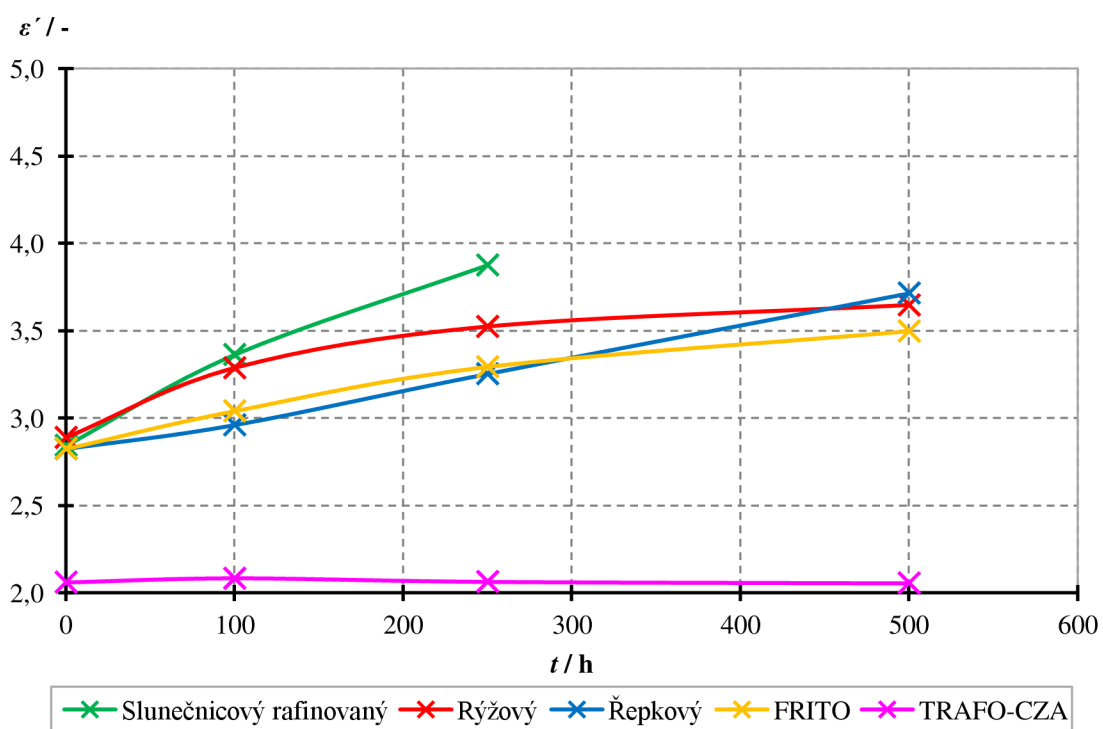
Obr. 30: Časové průběhy hodnot ztrátových činitelů olejů po zrychlené degrační zkoušce měřené při pokojové teplotě



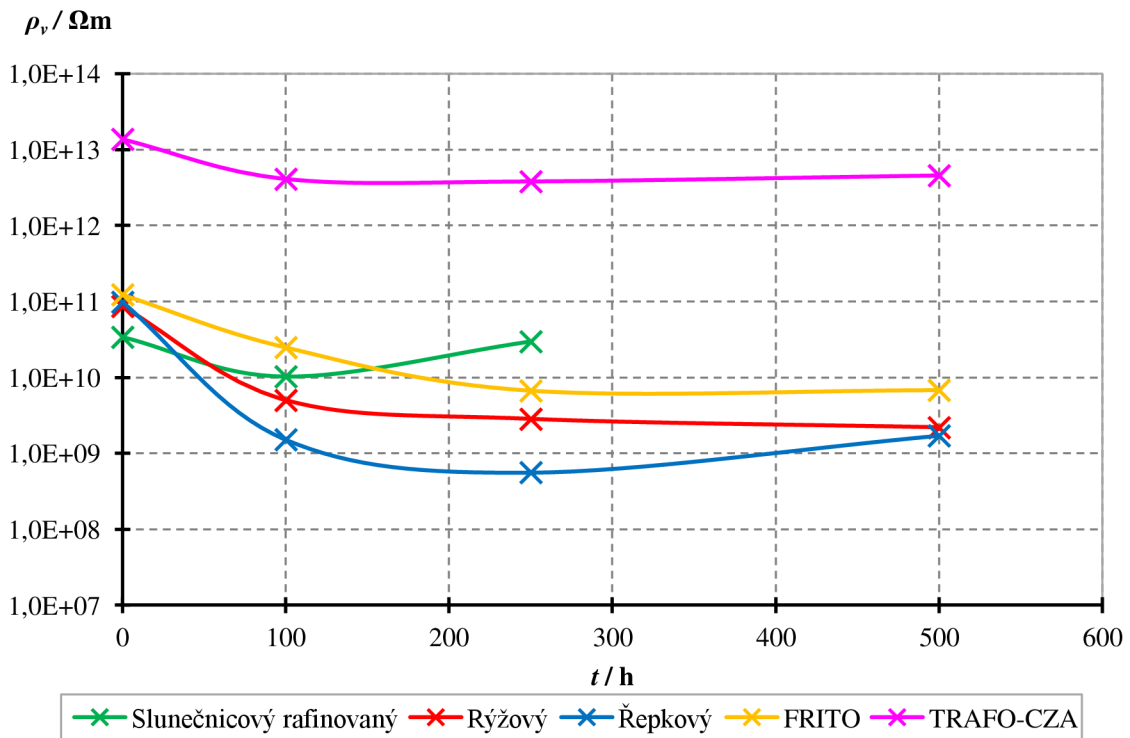
Obr. 31: Časové průběhy hodnot ztrátových činitelů olejů po zrychlené degrační zkoušce měřené při teplotě $90^{\circ}C$



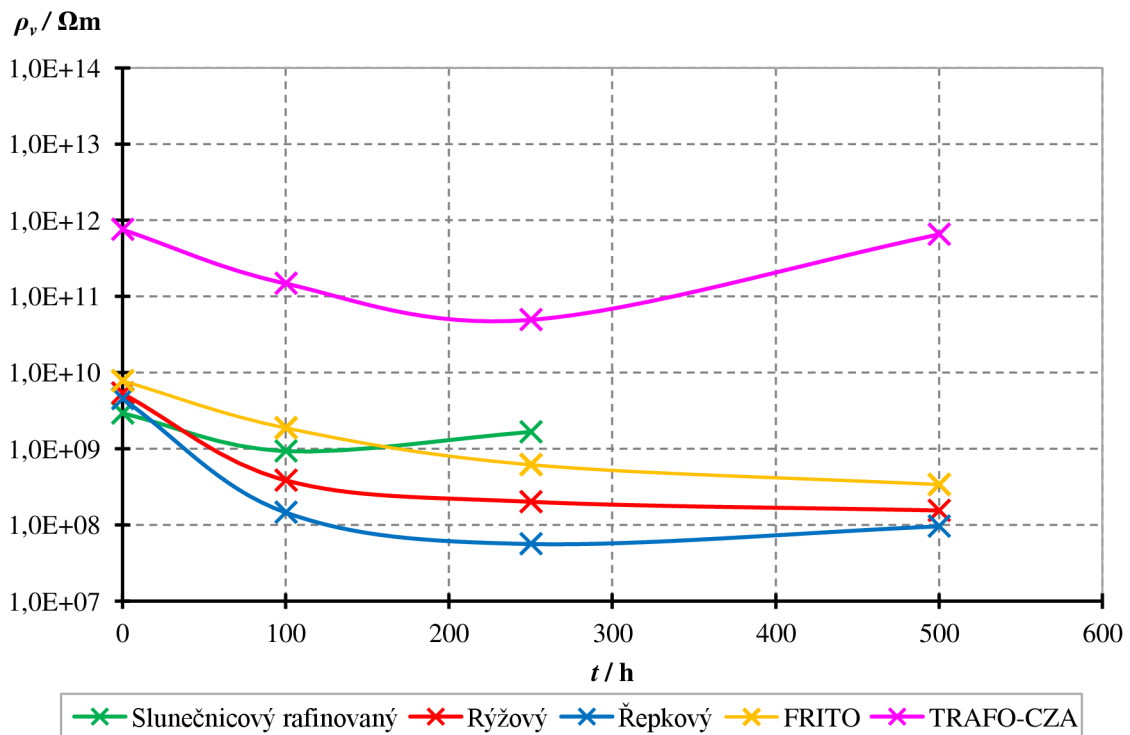
Obr. 32: Časové průběhy hodnot relativních permitivit olejů po zrychlené degrační zkoušce měřené při pokojové teplotě



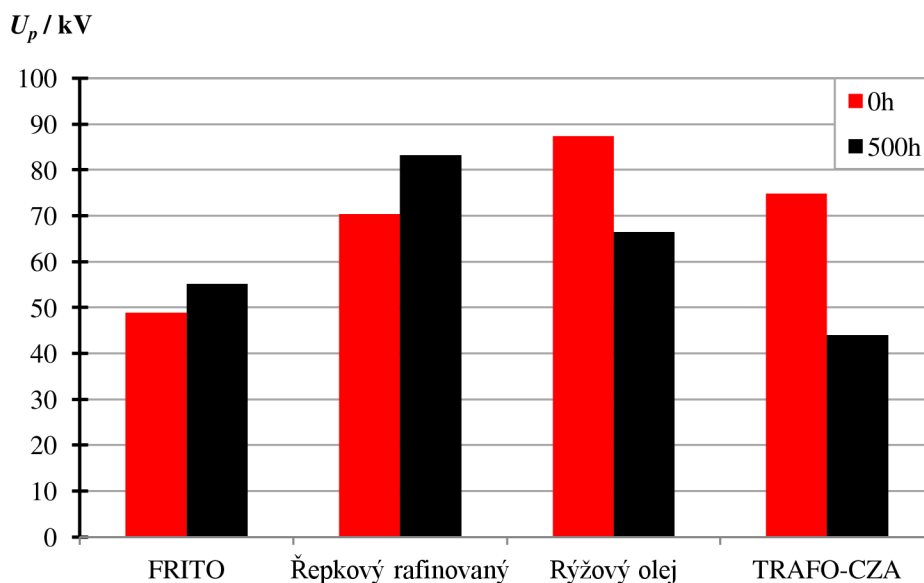
Obr. 33: Časové průběhy hodnot relativních permitivit olejů po zrychlené degrační zkoušce měřené při teplotě 90 °C



Obr. 34: Časové průběhy hodnot vnitřních rezistivit olejů po zrychlené degrační zkoušce měřené při pokojové teplotě



Obr. 35: Časové průběhy hodnot vnitřních rezistivit olejů po zrychlené degrační zkoušce měřené při teplotě 90 °C



Obr. 36: Srovnání naměřených středních hodnot průrazných napětí olejů v počátečním stavu a po degračním namáhání dlouhém 500 h

Tab. 12: Srovnání průběžných hodnot dielektrických parametrů podle délky namáhání pro pokojovou teplotu (~ 25 °C) a 90 °C

	<i>t</i> (h)	~ 25 °C (pokojová teplota)			90 °C		
		<i>tgδ</i> (-)	ϵ' (-)	ρ_v (Ω m)	<i>tgδ</i> (-)	ϵ' (-)	ρ_v (Ω m)
Slunečnicový olej	0	0,005	3,123	3,400E+10	0,083	2,843	2,930E+09
	100	0,011	3,780	1,028E+10	0,130	3,363	9,329E+08
	250	0,003	4,503	2,966E+10	0,067	3,875	1,660E+09
	500	-	-	-	-	-	-
Rýžový olej	0	0,001	3,153	8,665E+10	0,028	2,888	5,370E+09
	100	0,022	3,727	5,010E+09	0,347	3,287	3,857E+08
	250	0,038	4,007	2,830E+09	0,618	3,523	2,012E+08
	500	0,046	4,141	2,190E+09	0,686	3,647	1,545E+08
Řepkový rafinovaný olej	0	0,002	3,094	9,824E+10	0,042	2,823	4,540E+09
	100	0,103	3,233	1,520E+09	1,130	2,960	1,463E+08
	250	0,228	3,628	5,611E+08	2,347	3,253	5,647E+07
	500	0,064	4,194	1,710E+09	1,120	3,715	9,621E+07
FRITO	0	0,001	3,099	1,237E+11	0,026	2,824	7,810E+09
	100	0,007	3,379	2,493E+10	0,081	3,040	1,880E+09
	250	0,018	3,693	6,690E+09	0,231	3,293	6,173E+08
	500	0,016	4,004	6,800E+09	0,323	3,497	3,389E+08
TRAFO-CZA	0	0,00004	2,140	1,378E+13	0,00059	2,060	7,580E+11
	100	0,00008	2,127	4,110E+12	0,00268	2,082	1,484E+11
	250	0,00021	2,126	3,810E+12	0,01110	2,063	4,948E+10
	500	0,00014	2,127	4,570E+12	0,00139	2,055	6,535E+11

6.7 Výpočty

Pro výpočty aproximací naměřených hodnot bylo využito uvedených rovnic, popisujících danou problematiku a metody nejmenších čtverců. Pro výpočet vnitřní rezistivity byla použita funkce (34). Po zlogaritmování se dostane tvar

$$\ln \rho_v = \ln A + \frac{B}{T}$$

Rovnice se položí rovno nule. Dále podle metody nejmenší čtverců

$$S(A, B) = \sum_{i=1}^6 \left(-\ln \rho_v + \ln A + \frac{B}{T} \right)^2$$

Pro zjednodušení se používá substituce $a = \ln A$. Parciální derivací se dostane

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \cdot \sum_{i=1}^6 \left(-\ln \rho_v + a + \frac{B}{T} \right) = 2 \cdot \left(-\sum_{i=1}^6 \ln \rho_v + a \cdot \sum_{i=1}^6 1 + B \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} \right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial B} = 2 \cdot \sum_{i=1}^6 \left(-\ln \rho_v + a + \frac{B}{T} \right) \cdot \frac{1}{T} = 2 \cdot \left[-\sum_{i=1}^6 \left(\ln \rho_v \cdot \frac{1}{T} \right) + a \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} + B \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T^2} \right]$$

Úpravou a nulováním parciálních derivací soustavu rovnic se získá

$$a \cdot n + B \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} = \sum_{i=1}^6 \ln \rho_v$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} + B \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T^2} = \sum_{i=1}^6 \left(\ln \rho_v \cdot \frac{1}{T} \right)$$

Ze soustavy rovnic se vytvoří determinanty

$$\det D = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} \\ \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} & \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T^2} \end{vmatrix}$$

$$\det D_a = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^6 \ln \rho_v & \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} \\ \sum_{i=1}^6 \left(\ln \rho_v \cdot \frac{1}{T} \right) & \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T^2} \end{vmatrix}$$

$$\det D_B = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^6 \ln \rho_v \\ \sum_{i=1}^6 \frac{1}{T} & \sum_{i=1}^6 \left(\ln \rho_v \cdot \frac{1}{T} \right) \end{vmatrix}$$

Využitím Cramerova pravidla

$$a = \frac{\det D_a}{\det D}$$

$$B = \frac{\det D_b}{\det D}$$

Zpětný dosazením do substituce se dostane

$$A = e^{\frac{\det D_a}{\det D}}$$

Pro výpočty aproximace průběhů relativních permitivit a ztrátových činitelů byly použity rovnice

$$\varepsilon' \approx e^{\frac{W}{k \cdot T}} \quad (96)$$

$$tg\delta = a \cdot e^{\alpha \cdot T} \quad (97)$$

Rovnice (97) pro $tg\delta$ je empirického charakteru, která popisuje teplotní průběhy některých dielektrik. V dnešní době neexistuje obecná rovnice vyjadřující teplotní závislost ztrátového činitele. Je to současná problematika, která je předmětem mnoha výzkumů a studií. Výpočet dále pokračoval využitím metody nejmenších čtverců. Postup byl stejný jako u výpočtu koeficientů rovnice rezistivity. Koeficient determinace se vypočítá

$$R^2 = 1 - \frac{S_T}{S_Y} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

vypočítané hodnoty koeficientů determinace jsou uvedeny v **Příloha 3**. Konkrétní výpočty jsou k dispozici na přiloženém digitální médiu.

Pro výpočty středních hodnot průrazných napětí se používala rovnice (94), pro směrodatnou odchylku rovnice (94) a pro variační koeficient rovnice (95). Tyto hodnoty byly přímo spočítány přístrojem BAUR DTA 100C. Příklad výpočtu elektrické pevnosti využitím rovnice (38) pro FRITO olej (Tab. 16) je

$$E_d = \frac{\overline{U_p}}{d} = \frac{48,8}{2,5} = 19,52 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$$

6.8 Vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty ztrátových činitelů v závislosti na teplotě olejů v počátečním stavu (Obr. 20) mají obecně exponenciální charakter. To je způsobeno hlavně vodivostními ztrátami, které se odvíjí od elektrické vodivosti. Působením tepla dochází k driftové pohyblivosti iontů a tím i k nárůstu vodivosti. U oleje TRAF0-CZA se projevují pouze vodivostní ztráty. U rostlinných olejů, které jsou slabě polární, se projevují i malé polarizační ztráty. Hodnotou ztrátového činitele v počátečním stavu vynikal olej TRAF0-CZA, jehož ztrátový činitel se v rozsahu teplot 22 – 110 °C pohyboval řádově od 10^{-5} do 10^{-3} . Nejhorší hodnoty ztrátových činitelů vykazovaly MĚRO, sojový surový olej a řepkový nerafinovaný olej. Jejich hodnoty se pohybovaly řádově od 10^{-1} do 10^1 . Vysoký ztrátový činitel byl způsoben charakterem dané kapaliny (MĚRO), přítomnými koloidními částicemi, polárními složkami a nečistotami (neodfiltrované částice). Pro použití jako elektroizolační kapaliny jsou tyto kapaliny zcela nevhodné. Nejlepších výsledků z rostlinných olejů dosáhly FRITO, kukuřičný olej, řepkový rafinovaný olej, rýžový olej, slunečnicový olej, kyselina olejová a kyselina linolová. Jejich hodnoty se v měřeném rozsahu teplot pohybovaly řádově od 10^{-4} do 10^{-1} . Při teplotě 90°C (u transformátorů se tato teplota považuje za nejvyšší provozní teplotu) došlo k nárůstu ztrátového činitele od počáteční teploty u všech olejů téměř o 2 řády. Nejvíce teplotně závislá byla kyselina linolová. Hodnoty permitivity olejů v počátečním stavu (Obr. 21) lze rozdělit podle typu kapaliny. Permitivita minerálního oleje TRAF0-CZA se pohybuje kolem 2,1, permitivita vyšších mastných kyselin kolem 2,4, a permitivita rostlinných olejů má hodnotu v rozmezí 2,7 – 3,2. S rostoucí teplotou se mění hustota a viskozita látek, která zapříčiní změnu koncentrace polarizovaných částic. Z tohoto důvodu mají teplotní závislosti permitivity klesající charakter. Nejlepší vnitřní rezistivitu v počátečním stavu (Obr. 22) měl TRAF0 CZA (10^{11} - 10^{13} Ωm) a nejhorší MĚRO (10^7 – 10^8 Ωm). Vnitřní rezistivita olejů s teplotou klesá, což je způsobeno elektrickou vodivostí. Jak už bylo zmíněno výše, s rostoucí teplotou se snižuje hodnota dynamické viskozity a tím dochází k nárůstu pohyblivosti iontů, což zapříčiní zvýšení elektrické vodivosti. Pokles rezistivity ve srovnání hodnot při pokojové teplotě a 90°C se pohyboval o jeden až dva řády v závislosti na kapalině. Hodnoty rezistivity jsou uvedeny v tabulce Tab. 15. Rýžový olej disponoval největší elektrickou pevností o hodnotě 34,96 kV.mm⁻¹, elektrická pevnost oleje TRAF0-CZA byla 29,92 kV.mm⁻¹ a nejmenší elektrickou pevnost měl olej FRITO s hodnotou 19,52 kV.mm⁻¹. Pro přesné porovnání hodnot olejů v počátečním stavu slouží tabulky uvedené v **Příloha 1**.

Naměřené hodnoty ztrátových činitelů rostlinných olejů po 100 h dlouhém namáhání (Obr. 27) vykazují oproti počátečnímu stavu nárůst. Nejmenší nárůst měl olej TRAF0-CZA kdy rozdíl při pokojové teplotě činil pouze 0,00004 (viz. Tab. 12 nebo Tab. 17). Z rostlinných olejů nejlepších výsledků dosahoval olej FRITO s rozdílem 0,006 při pokojové teplotě. Největší nárůst se zaznamenal u řepkového oleje. Degradční procesy probíhající u rostlinných olejů, vzniklé působením tepla a vzduchu, jsou převážně oxidace a následná polymerace. Rostlinné oleje, na kterých byla provedena degradační zkouška, patří do skupiny polo-vysychavých a vysychavých olejů. Tyto oleje mají vlastnost pohlcování kyslíku, to znamená, že působením tepla a vzduchu dochází k oxidaci a polymeraci. Tento chemický proces je dán přítomností mastných kyselin, které mají nenasycené vazby. Celý proces je

navíc urychlen přítomností katalyzátoru. Pohlcováním kyslíku dochází k oxidaci triacycerolu. Výsledkem celého degradačního procesu se zvyšuje viskozita olejů a koncentrace polárních složek. Dielektrické ztráty jsou pak dány nejen vodivostními ztrátami ale i polarizačními ztrátami. Degradační procesy přítomné u minerálního oleje jsou dány především pohlcováním nečistot a vlhkosti. Degradační procesy ovlivnily všechny dielektrické parametry. S rostoucí viskozitou se snižuje pohyblivost iontů, tím se zvyšuje permitivita a vnitřní rezistivita. U vzorků rostlinných olejů namáhaných 100 h se permitivita pohybovala v rozmezí 3,2 – 3,8 (viz Obr. 27 a Tab. 20). Vnitřní rezistivita rostlinných olejů se pohybovala v rozmezí $10^8 - 10^{10} \Omega \cdot m$ a u minerálního $10^{10} - 10^{12} \Omega \cdot m$ (viz. Obr. 27 a Tab. 23). Naměřené hodnoty ztrátových činitelů rostlinných olejů po 250 h dlouhém namáhání jsou na Obr. 28. Nejlepší hodnotu vykazoval slunečnicový olej (ztrátový činitel při pokojové teplotě 0,003), který dosáhl lepšího ztrátového činitele než v počátečním stavu. Bylo to způsobeno tím, že vykazoval největší míru polymerace. Po 250 h namáhání se jednalo o vysoce viskózní kapalinu. Změna struktury slunečnicového oleje způsobila malou vodivost a tím i malé vodivostní ztráty. Nejhorší ztrátový činitel měl řepkový olej s hodnotou 0,228 při pokojové teplotě. Minerální olej stále vykazoval velmi nízký ztrátový činitel o velikosti 0,00021. Ostatní hodnoty ztrátových činitelů jsou uvedeny v Tab. 18. Relativní permitivita olejů namáhaných 250 h se pohybovala v rozmezí 3,1 – 4,5 (viz. Obr. 28 a Tab. 21). Nejvyšších hodnot kvůli strukturálním změnám dosahoval slunečnicový olej. Vnitřní rezistivita rostlinných olejů byla v rozmezí $10^7 - 10^{10} \Omega \cdot m$ (viz. Obr. 28 a Tab. 24). Po 500 h dlouhém namáhání dosáhl stupeň polymerace u slunečnicového oleje takového stavu, kdy se vnitřní struktura změnila na pevnou gelovou hmotu. Z tohoto důvodu se vzorek slunečnicového oleje po namáhání 500 h musel vyřadit z experimentu, protože se nejednalo o kapalinu, a jeho dielektrické parametry nemohly být stanoveny. Porovnání ztrátových činitelů olejů namáhaných 500 h s počátečními hodnotami (hodnoty ztrátových činitelů při pokojové teplotě) je následující: hodnoty oleje FRITO vzrostly o 0,015 (nižší hodnota než u vzorku namáhaného 250 h je způsobena polymerací), hodnoty řepkového oleje vzrostly o 0,062 (nižší hodnota než u vzorku namáhaného 250 h je způsobena polymerací), hodnoty rýžového oleje vzrostly o 0,045. S rostoucí degradací rostly i polární složky v olejích, to znamená, že oleje vykazovaly větší polarizační ztráty. Hodnoty ztrátových činitelů oleje TRAF0-CZA po celou dobu degradační zkoušky vykazovaly velmi dobré hodnoty a lišily se minimálně. Porovnání relativních permitivit olejů namáhaných 500 h s počátečními hodnotami (hodnoty relativních permitivit při pokojové teplotě) je následující: u oleje FRITO vzrostla z 3,099 na 4,004; u řepkového oleje vzrostla z 3,094 na 4,194, u rýžového oleje z 3,153 na 4,141. Olej TRAF0 vykazoval dobrou hodnotu permitivity po celou dobu experimentu. Porovnání vnitřních rezistivit olejů namáhaných 500 h s počátečními hodnotami (hodnoty vnitřních rezistivit při pokojové teplotě) je následující: u rýžového a řepkového oleje klesla o jeden řád, u oleje FRITO o řády dva. Nižší hodnoty než u vzorků namáhaných 250 h jsou způsobeny polymerací. Celkové porovnání hodnot je uvedeno v Tab. 12. Závislosti dielektrický parametrů v čase jsou uvedeny na Obr. 30 až Obr. 35. Rozdíl průrazných napětí je zobrazen na Obr. 36. Z pohledu oxidační stability na tom byl nejlépe olej FRITO. Díky vysokému obsahu kyseliny olejové vykazoval nejlepší teplotní a oxidační stabilitu. Nejhorší teplotní a oxidační stabilitu vykazoval řepkový olej. Už po 100 h dlouhém namáhání nebyly jeho

dielektrické parametry vyhovující. Po 500 h došlo k zlepšení dielektrických parametrů díky polymeraci, avšak s doprovázeným nárůstem viskozity.

S časem namáhání se měnila i barva vzorků. Barva vzorků v počátečním stavu je zobrazena na Obr. 25. Barva vzorků po namáhání 100 h je zobrazena na Obr. 37, po namáhání 250 h je zobrazena na Obr. 38 a po namáhání 500 h je zobrazena na Obr. 39.



Obr. 37: Barva vzorků po namáhání dlouhém 100h. Zleva: řepkový olej, slunečnicový olej, TRAFO-CZA, olej FRITO a rýžový olej



Obr. 38: Barva vzorků po namáhání dlouhém 250h. Zleva: řepkový olej, slunečnicový olej, TRAFO-CZA, olej FRITO a rýžový olej



Obr. 39: Barva vzorků po namáhání dlouhém 500h. Zleva: řepkový olej, TRAFO-CZA, olej FRITO a rýžový olej

Použitím demonstrativní škály barev (Obr. 9) podle normy ISO 2049 lze stanovit orientační hodnoty barev. Hodnoty barev olejů v počátečních stavech jsou: 0,5 pro FRITO; 0 (čirý) pro TRAFO-CZA; 0,5 pro slunečnicový i řepkový olej a 1 pro rýžový olej. Hodnoty barev olejů

po 100 h dlouhé namáhání jsou: 1 pro FRITO; 0 (čirý) pro TRAF0-CZA; 1 pro slunečnicový olej; 3,5 pro řepkový olej a 2,5 pro olej rýžový. Hodnoty barev olejů po 250 h dlouhém namáhání jsou: 2 pro FRITO; 0,5 pro TRAF0-CZA; 2,5 pro slunečnicový olej; 6 pro řepkový olej a 5 pro olej rýžový. Hodnoty barev olejů po 500 h dlouhém namáhání jsou: 3,5 pro FRITO; 1 pro TRAF0-CZA; 7,5 pro řepkový olej a 6,5 pro rýžový olej.

Porovnáním olejů s požadavky kladenými na elektroizolační kapaliny (kapitola 2.4) lze z naměřených hodnot usoudit, že oleje v počátečním stavu lze použít pro zařízení kategorie B, C a E. Je však třeba vzít v úvahu nízkou oxidační stabilitu rostlinných olejů, proto lze doporučit použití jen v případě přidání antioxidačních aditiv. Oleje s vysokým obsahem kyseliny olejové dosahují dobrých hodnot, proto je lze z testovaných kapalin doporučit nejvíce. Oxidační stabilita minerálního oleje TRAF0-CZA byla dobrá po celou dobu experimentu a je ho možné použít do všech kategorií zařízení.

Závěr

Diplomová se dělí na teoretickou a praktickou část. Teoretická část rozebírá současnou problematiku elektroizolačních kapalin. Jsou zde uvedeny jednotlivé druhy elektroizolačních kapalin, a následně jsou popsány jejich vlastnosti, chemické složení a použití. Další část teorie se zabývá fyzikou dielektrických kapalin. Čtvrtá kapitola popisuje degradační procesy, a představuje modely popisující tepelné, elektrické a kombinované stárnutí. Poslední část teorie je věnována diagnostice elektroizolačních kapalin a to konkrétně měření relativní permitivity, ztrátového činitele, rezistivity a průrazného napětí podle normy ČSN EN 20247 a ČSN EN 60156.

Diplomová práce se soustředila na výběr alternativních elektroizolačních kapalin na bázi přírodních esterů. Z rostlinných olejů byly vybrány: FRITO slunečnicový olej s vysokým obsahem kyseliny olejové, řepkový rafinovaný olej, řepkový nerafinovaný olej, slunečnicový rafinovaný olej, rýžový olej, kukuřičný olej, sojový surový olej a MEŘO. Z vyšších mastných kyselin byly zvoleny kyseliny s největším zastoupením ve vybraných vzorcích (kyselina olejová a linolová). Jako referenční vzorek posloužil minerální olej TRAF0-CZA. U všech 11 vzorků byly naměřeny dielektrické parametry v počátečním stavu. Z naměřených hodnot byli vybráni 4 kandidáti rostlinných olejů, pro které byla navržena a provedena zrychlená degradační zkouška. Zrychlená degradační zkouška byla provedena podle normy ČSN 61125. Princip spočíval v probublávání olejů proudem vzduchu při 120 °C za přítomnosti tuhého měděného katalyzátoru. Doba namáhání byla stanovena na délku 500 h. Vzorky kapalin se odebíraly intervalu 100, 250 a 500 h. U naměřených vzorků byly stanoveny teplotní závislosti $tg\delta = F(T)$, $\varepsilon' = F(T)$, $\ln \rho_v = F(1/T)$, průrazné napětí a časové závislosti jednotlivých dielektrických parametrů v průběhu degradační zkoušky. Výsledné závislosti byly aproximovány náhradní funkcí.

Jako jeden z degradačních procesů se u rostlinných olejů projevila polymerace. Je způsobena pohlčováním kyslíku a působením tepla. Chemický proces polymerace je dán přítomností mastných kyselin, které mají nenasycené vazby. Celý proces je navíc urychlen přítomností katalyzátoru. Pohlčováním kyslíku dochází k oxidaci triaglycerolu. Výsledkem celého degradačního procesu se zvyšuje viskozita olejů a koncentrace polárních složek. Z tohoto důvodu měly oleje netypický průběh dielektrických parametrů v čase. Uvedené hodnoty a podrobný popis a diskuze výsledků je uveden v kapitole 6.8.

Z pohledu oxidační stability a kvality dielektrických parametrů byl nejlepším rostlinným olejem olej slunečnicový s vysokým obsahem kyseliny olejové. V počátečním stavu ho lze použít pro zařízení kategorie B, C a E. Je však třeba vzít v úvahu jeho nízkou oxidační stabilitu, proto ho lze doporučit k použití jen v případě přidání antioxidantů. Jako další studium rostlinných olejů se doporučuje stanovit frekvenční závislosti jednotlivých vzorků a provést zrychlenou degradační zkoušku za současného působení tepla a elektrického pole. Výsledkem by pak mohlo být i studium a úprava matematických modelů stárnutí. Zmíněné doporučení mohou být předmětem k dalším akademickým pracím.

Použitá literatura

- [1] 2830/2831 *Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer: Operating Instructions*. 2012.
- [2] 2903 *Test cell for liquids insulating materials: Operating Instructions*. 2012.
- [3] ČSN EN 60247. *Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ($\tan \delta$) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Český normalizační institut, 2005.
- [4] ČSN EN 60422 Izolační olej v provozu. In: *ELDIAG s.r.o.* [online]. Praha: ELDIAG s.r.o., 2013 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/csn-en-60422-doporucene-hodnoty-pro-izolacni-olej-v-provozu-zkraceny-vytah>
- [5] ČSN EN 61039. *Klasifikace izolačních kapalin*. Český normalizační institut, 2009.
- [6] ČSN EN 61125. *Nové izolační kapaliny na bázi uhlovodíků. Zkušební metody na vyhodnocování oxidační stálosti*. Český normalizační institut, 1996.
- [7] ČSN ISO 2049. *Ropné výrobky - Stanovení barvy (stupnice ASTM)*. 2. vydání. Český normalizační institut, 2006.
- [8] Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku* [online]. Plzeň, 2002 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/diagnostika-transformatorovych-oleju-v-navaznosti-na-prodlouzeni-zivotnosti-transformatoru--14835>
- [9] DTA 100 C: BAUR Oil Breakdown Voltage Tester. In: *BAUR* [online]. Sulz/Austria: BAUR, 2016. Dostupné z: http://www.baur.eu/XooWebKit/bin/download.php/1099f_c434472ea3/DS_Oil%20breakdown%20voltage%20tester_DTA%20100%20C_BAUR_en-gb.pdf
- [10] FOFANA, I. 50 years in the development of insulating liquids. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. Université du Québec à Chicoutimi (Canada): IEEE, 2013, 13 - 25. ISSN 0883-7554.
- [11] GJÆRDE, A C. *Multifactor ageing models – origin and similarities: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. October 1995. 7. ISBN 0-7803-2931-7
- [12] HÁJEK, Jan. Diagnostický systém pro studium aplikovatelnosti alternativních izolačních kapalin [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/7455/Jan_Hajek_DP.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [13] HASSDENTEUFEL, Josef, et al. *Elektrotechnické materiály*. 2. Vydání. Bratislava :Alfa, 1978. 607 s. ISBN 63-555-78.
- [14] JIRÁK, J., et al. *Materiály a technická dokumentace : Materiály v elektrotechnice*. Brno : FEKT Vut, 2004. 149 s.
- [15] KAZELLE, J., HAVLÍČEK, S., JIRÁK, J., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘIKOVÁ, M., VANĚK, J. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy, elektronické texty*. Brno: 2003
- [16] LIEDERMANN, K. *Klimatotechnologie*, Brno: Vysoké učení technické v Brně.

- [17] MAKÓWKA, T. Diagnostika vlastností elektroizolačních kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [18] MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [19] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [20] Měření viskozity: Úloha č. 3 [online]. In: . Brno: VUT v Brně, 2015, s. 7 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=98506
- [21] *MOGUL TRAFÓ CZ-A: INHIBOVANÝ TRANSFORMÁTOROVÝ OLEJ* [online]. In: . [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_trafo_cza_z5.pdf
- [22] MONTANARI, G. C.; MAZZANTI, G.; SIMONI, L. *Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades*, October 2002, IEEE Vol. 9, No. 5, p. 730-745.
- [23] OILCOL in Measuring the ASTM D1500 Oil Color: APPLICATION NOTE – OIL COLOR. In: *Kytola instruments*[online]. Kytola instruments [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.insatech.com/downloads/Oilcolor_app15.pdf
- [24] Perspektivy v oblasti kapalných izolantů [online]. [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>.
- [25] POLANSKÝ, Radek. Tepelné stárnutí elektroizolačních kapalin. *Elektrorevue*. 2008 [cit. 2012-04-09]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: www.elektrorevue.cz/cz/download/tepelne-starnuti-elektroizolacnich-kapalin/
- [26] *Reologie a reometrie kapalin* [online]. In: . Univerzita Pardubice ÚSTAV APLIKOVANÉ FYZIKY A MATEMATIKY, s. 11 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>
- [27] *SIGMA-ALDRICH* [online]. Missouri, USA: Sigma-Aldrich, 2016. Dostupné také z: <https://www.sigmaaldrich.com>
- [28] SIMONI, L. *A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage*, August 1981, IEEE Vol. EI-16, p. 277-289. ISSN 0018-9367.
- [29] SPOHNER, M. Diagnostika perspektivních elektroizolačních kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [30] ŠIRŮČEK, Martin. *Zlepšování parametrů výkonových transformátorů* [online]. Plzeň, 2013. Dostupné také z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/14158/Sirucek%20-%20Zlepsovani%20parametru%20vykonovych%20transformatoru.pdf?sequence=1>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [31] TRNKA, P a R POLANSKÝ. Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír. In: *Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2007. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>

- [32] TUREK, Jan. Možnosti ověření vlastností izolačních kapalin [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z:
https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2686/DP_Turek_E10N0063P.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Pavel Prosr, Ph.D
- [33] Zkoušky oxidační stability izolačních olejů. *ELDIAG s.r.o.* [online]. Praha, 2001 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/zkousky-oxidacni-stability-izolacnich-oleju>

Seznam symbolů

\vec{E}	[Vm ⁻¹]	vektor intenzity elektrického pole
ϵ_0	[Fm ⁻¹]	permitivita vakua,
ϵ_∞	[-]	optická permitivita
A		předexponenciální faktor udávající frekvenci střetávajících se molekul
C_0	[F]	kapacita prázdné měřicí nádoby
E	[kJ/mol]	aktivační energie udávající výši energetické bariéry, kterou musí překonat $m_0 - m$ molekul, aby mohly vstoupit do reakce
E	[J]	aktivační energie
E_{lok}	[Vm ⁻¹]	intenzita lokálního pole
E_p	[Vm ⁻¹]	elektrická pevnost
f	[Hz]	frekvence
h	[J.s]	Plankova konstanta ($\approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)
k		rychlostní konstanta
k	[J.K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta ($\approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K ⁻¹)
L_T	[h]	doba života izolačního materiálu
n	[m ⁻³]	koncentrace polarizovatelných částic
N_A	[mol ⁻¹]	Avogadrova konstanta
R		univerzální plynová konstanta
R	[-]	rychlostní konstanta stárnutí
R'	[s ⁻¹]	celkový počet srážek reagujících molekul za jednotku času
R_v	[Ω]	naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu v
T	[K]	absolutní teplota
$tg \delta$	[-]	ztrátový čínnitel
U_p	[V]	průrazné napětí
U_{pi}		hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů v kV
v	[%]	variační koeficient
W	[J]	energie
γ	[S.m ⁻¹]	elektrická vodivost
ϵ^*	[-]	komplexní permitivita
ϵ'	[-]	relativní permitivita - reálná složka komplexní permitivity
ϵ''	[-]	ztrátové číslo – imaginární složka komplexní permitivity
ϵ_s	[-]	statická permitivita
η		konstanta úměrnosti
Θ	[K]	teplota stárnutí
λ	[eV]	vzdálenost mezi oběma stavy (šířka energetické bariéry)
μ_i	[Cm]	indukovaný dipólový moment
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota kapaliny
ρ_v	[Ωm]	vnitřní rezistivita
τ	[kg.s ⁻¹ .m ⁻¹]	tečné napětí úměrné gradientu rychlosti
ω	[rads ⁻¹]	kruhová frekvence
α	[Cm ² V ⁻¹]	polariyovatelnost

Přílohy

Příloha 1: Naměřené hodnoty v počátečním stavu

Tab. 13: Naměřené teplotní závislosti ztrátového činitele $tg\delta$ olejů v počátečním stavu

Tab. 14: Naměřené teplotní závislosti relativní permitivity ε' olejů v počátečním stavu

Tab. 15: Naměřené teplotní závislosti vnitřní rezistivity ρ_v olejů v počátečním stavu

Tab. 16: Naměřené hodnoty průrazných napětí U_p , jejich středních hodnot s , směrodatných odchylek a variačních koeficientů v

Příloha 2: Naměřené hodnoty degradovaných olejů

Tab. 17: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 100 h dlouhém namáhání

Tab. 18: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 250 h dlouhém namáhání

Tab. 19: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 500 h dlouhém namáhání

Tab. 20: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 100 h dlouhém namáhání

Tab. 21: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 250 h dlouhém namáhání

Tab. 22: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 500 h dlouhém namáhání

Tab. 23: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 100 h dlouhém namáhání

Tab. 24: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 250 h dlouhém namáhání

Tab. 25: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 500 h dlouhém namáhání

Tab. 26: Naměřené hodnoty průrazných napětí U_p , jejich středních hodnot s , směrodatných odchylek a variačních koeficientů v olejů po 500 h dlouhém namáhání

Příloha 3: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace

Tab. 27: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů v počátečním stavu

Tab. 28: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 100 h dlouhém namáhání

Tab. 29: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 250 h dlouhém namáhání

Tab. 30: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 500 h dlouhém namáhání

Příloha 1

Tab. 13: Naměřené teplotní závislosti ztrátového činitele $tg\delta$ olejů v počátečním stavu

Počáteční hodnoty	Ztrátový činitel $tg\delta(-)$					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	0,001	0,003	0,006	0,012	0,026	0,036
Kukuřičný olej	0,002	0,004	0,007	0,014	0,030	0,066
Kyselina linolová	0,008	0,016	0,026	0,047	0,122	0,350
Kyselina olejová	0,001	0,001	0,004	0,012	0,047	0,184
MEŘO	1,140	2,010	3,380	4,907	6,827	9,050
Řepkový rafinovaný olej	0,002	0,005	0,012	0,021	0,042	0,072
Řepkový nerafinovaný olej	0,059	0,140	0,308	0,536	0,954	1,460
Rýžový olej	0,001	0,003	0,007	0,013	0,028	0,061
Slunečnicový rafinovaný olej	0,005	0,012	0,023	0,041	0,083	0,138
Surový sojový olej	0,177	0,420	0,799	1,380	2,447	3,840
TRAFO-CZA	0,00004	0,00006	0,00010	0,00021	0,00059	0,00095

Tab. 14: Naměřené teplotní závislosti relativní permitivity ε' olejů v počátečním stavu

Počáteční hodnoty	Relativní permitivita $\varepsilon'(-)$					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	3,099	3,025	2,961	2,899	2,824	2,753
Kukuřičný olej	3,075	3,026	2,962	2,899	2,823	2,749
Kyselina linolová	2,399	2,390	2,390	2,380	2,371	2,365
Kyselina olejová	2,373	2,361	2,350	2,343	2,339	2,340
MEŘO	3,247	3,151	3,059	2,983	2,896	2,808
Řepkový rafinovaný olej	3,094	3,026	2,962	2,899	2,823	2,752
Řepkový nerafinovaný olej	3,081	3,012	2,944	2,882	2,811	2,738
Rýžový olej	3,153	3,089	3,027	2,970	2,888	2,812
Slunečnicový rafinovaný olej	3,123	3,054	2,986	2,923	2,843	2,772
Surový sojový olej	3,148	3,069	3,002	2,943	2,864	2,795
TRAFO-CZA	2,140	2,120	2,101	2,083	2,060	2,039

Tab. 15: Naměřené teplotní závislosti vnitřní rezistivity ρ_v olejů v počátečním stavu

Počáteční hodnoty	Vnitřní rezistivita ρ_v (Ωm)					
	$\sim 25^\circ\text{C}$	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	1,237E+11	5,417E+10	2,640E+10	1,584E+10	7,810E+09	5,100E+09
Kukuřičný olej	3,590E+10	2,994E+10	1,670E+10	9,490E+09	4,620E+09	2,290E+09
Kyselina linolová	1,982E+10	9,990E+09	5,900E+09	3,280E+09	1,280E+09	4,902E+08
Kyselina olejová	2,862E+11	1,110E+11	3,745E+10	1,402E+10	3,410E+09	9,052E+08
MEŘO	1,114E+08	6,487E+07	4,129E+07	3,045E+07	2,300E+07	1,779E+07
Řepkový rafinovaný olej	9,824E+10	4,279E+10	1,907E+10	9,900E+09	4,540E+09	2,200E+09
Řepkový nerafinovaný olej	2,570E+09	1,060E+09	4,855E+08	2,702E+08	1,516E+08	9,812E+07
Rýžový olej	8,665E+10	4,116E+10	1,870E+10	1,083E+10	5,370E+09	2,470E+09
Slunečnicový rafinovaný olej	3,400E+10	1,974E+10	1,053E+10	5,720E+09	2,930E+09	1,920E+09
Surový sojový olej	7,615E+08	3,090E+08	1,640E+08	9,446E+07	5,426E+07	3,595E+07
TRAFO-CZA	1,378E+13	1,013E+13	4,430E+12	1,970E+12	7,580E+11	4,548E+11

Tab. 16: Naměřené hodnoty průrazných napětí U_p , jejich středních hodnot s , směrodatných odchylek a variačních koeficientů v olejů v počátečním stavu

Počáteční	FRITO	Kukuřičný olej	MEŘO	Řepkový rafinovaný	Řepkový nerafinovaný	Rýžový olej	Slunečnicový rafinovaný	Surový sojový	Trafo CZ-A
Měření 1 (kV)	37,50	64,40	49,70	48,30	75,00	89,40	50,40	46,20	85,00
Měření 2 (kV)	55,20	67,90	60,70	85,90	80,60	87,20	60,10	61,50	80,20
Měření 3 (kV)	39,00	46,20	52,70	63,10	81,90	79,10	62,70	66,10	63,40
Měření 4 (kV)	53,80	69,20	65,30	76,20	74,30	87,80	73,90	59,80	77,40
Měření 5 (kV)	52,60	81,00	65,60	68,80	75,20	84,60	82,80	74,50	71,10
Měření 6 (kV)	54,90	78,80	52,10	80,10	78,30	96,40	60,70	76,10	71,70
U_p (kV)	48,80	67,90	57,70	70,40	77,60	87,40	65,10	64,00	74,80
s (kV)	8,30	12,50	7,10	13,50	3,20	5,70	11,50	11,00	7,70
v (%)	16,90	18,30	12,20	19,20	4,10	6,50	17,60	17,20	10,20
Elektrická pevnost (kV.mm ⁻¹)	19,52	27,16	23,08	28,16	31,04	34,96	26,04	25,60	29,92
Teplota (°C)	25	24	27	26	26	26	25	27	28
Frekvence (Hz)	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Příloha 2

Tab. 17: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 100 h dlouhém namáhání

100 h	Ztrátový činitel $tg\delta(-)$					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	0,007	0,014	0,028	0,049	0,081	0,158
Řepkový rafinovaný olej	0,103	0,226	0,411	0,676	1,130	1,580
Rýžový olej	0,022	0,058	0,116	0,197	0,347	0,565
Slunečnicový rafinovaný olej	0,011	0,020	0,040	0,070	0,130	0,240
TRAFO-CZA	0,00008	0,00020	0,00052	0,00109	0,00268	0,00710

Tab. 18: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 250 h dlouhém namáhání

250 h	Ztrátový činitel $tg\delta(-)$					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	0,018	0,033	0,066	0,122	0,231	0,408
Řepkový rafinovaný olej	0,228	0,457	0,848	1,350	2,347	3,740
Rýžový olej	0,038	0,088	0,180	0,326	0,618	1,090
Slunečnicový rafinovaný olej	0,003	0,007	0,015	0,029	0,067	0,130
TRAFO-CZA	0,00021	0,00071	0,00188	0,00413	0,01110	0,02080

Tab. 19: Naměřené hodnoty teplotních závislostí ztrátového činitele $tg\delta$ po 500 h dlouhém namáhání

500 h	Ztrátový činitel $tg\delta(-)$					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	0,016	0,041	0,085	0,155	0,323	0,591
Řepkový rafinovaný olej	0,064	0,154	0,320	0,572	1,120	1,980
Rýžový olej	0,046	0,086	0,181	0,351	0,686	1,210
Slunečnicový rafinovaný olej	-	-	-	-	-	-
TRAFO-CZA	0,00014	0,00021	0,00032	0,00051	0,00139	0,00247

Tab. 20: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 100 h dlouhém namáhání

100 h	Relativní permitivita ε' (-)					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	3,379	3,297	3,214	3,134	3,040	2,951
Řepkový rafinovaný olej	3,233	3,152	3,116	3,047	2,960	2,882
Rýžový olej	3,727	3,608	3,506	3,410	3,287	3,176
Slunečnicový rafinovaný olej	3,780	3,686	3,578	3,479	3,363	3,269
TRAFO-CZA	2,127	2,137	2,121	2,104	2,082	2,061

Tab. 21: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 250 h dlouhém namáhání

250 h	Relativní permitivita ε' (-)					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	3,693	3,611	3,509	3,415	3,293	3,174
Řepkový rafinovaný olej	3,628	3,551	3,458	3,365	3,253	3,155
Rýžový olej	4,007	3,884	3,794	3,675	3,523	3,392
Slunečnicový rafinovaný olej	4,503	4,352	4,198	4,057	3,875	3,723
TRAFO-CZA	2,126	2,120	2,103	2,085	2,063	2,041

Tab. 22: Naměřené hodnoty teplotních závislostí relativní permitivity ε' po 500 h dlouhém namáhání

500 h	Relativní permitivita ε' (-)					
	~ 25 °C	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	4,004	3,869	3,752	3,643	3,497	3,372
Řepkový rafinovaný olej	4,194	4,071	3,961	3,866	3,715	3,583
Rýžový olej	4,141	4,047	3,926	3,803	3,647	3,512
Slunečnicový rafinovaný olej	-	-	-	-	-	-
TRAFO-CZA	2,127	2,115	2,097	2,079	2,055	2,032

Tab. 23: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 100 h dlouhém namáhání

100 h	Vnitřní rezistivita ρ_v (Ωm)					
	$\sim 25^\circ\text{C}$	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	2,493E+10	1,195E+10	5,190E+09	3,000E+09	1,880E+09	1,090E+09
Řepkový olej	1,520E+09	7,714E+08	4,184E+08	2,533E+08	1,463E+08	9,897E+07
Rýžový olej	5,010E+09	2,420E+09	1,190E+09	6,848E+08	3,857E+08	2,307E+08
Slunečnicový olej	1,028E+10	5,440E+09	2,850E+09	1,640E+09	9,329E+08	5,343E+08
TRAFO-CZA	4,110E+12	1,900E+12	6,611E+11	3,386E+11	1,484E+11	5,406E+10

Tab. 24: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 250 h dlouhém namáhání

250 h	Vnitřní rezistivita ρ_v (Ωm)					
	$\sim 25^\circ\text{C}$	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	6,690E+09	4,480E+09	2,240E+09	1,170E+09	6,173E+08	3,499E+08
Řepkový olej	5,611E+08	2,773E+08	1,557E+08	9,824E+07	5,647E+07	3,537E+07
Rýžový olej	2,830E+09	1,380E+09	7,135E+08	3,805E+08	2,012E+08	1,173E+08
Slunečnicový olej	2,966E+10	1,297E+10	6,470E+09	3,560E+09	1,660E+09	9,184E+08
TRAFO-CZA	3,810E+12	8,369E+11	2,998E+11	1,368E+11	4,948E+10	2,671E+10

Tab. 25: Naměřené hodnoty teplotních závislostí vnitřních rezistivit ρ_v olejů po 500 h dlouhém namáhání

500 h	Vnitřní rezistivita ρ_v (Ωm)					
	$\sim 25^\circ\text{C}$	40°C	55°C	70°C	90°C	110°C
FRITO	6,800E+09	2,870E+09	1,340E+09	7,099E+08	3,389E+08	1,924E+08
Řepkový olej	1,710E+09	6,676E+08	3,265E+08	1,793E+08	9,621E+07	5,576E+07
Rýžový olej	2,190E+09	1,190E+09	5,889E+08	2,988E+08	1,545E+08	8,892E+07
Slunečnicový olej	-	-	-	-	-	-
TRAFO-CZA	4,570E+12	3,740E+12	2,180E+12	1,450E+12	6,535E+11	5,312E+11

Tab. 26: Naměřené hodnoty průrazných napětí U_p , jejich středních hodnot s , směrodatných odchylek a variačních koeficientů v olejů po 500 h dlouhém namáhání

500 h	FRITO	Řepkový rafinovaný	Rýžový olej	Trafo CZ-A	Slunečnicový rafinovaný
Měření 1 (kV)	42,40	96,20	56,00	46,20	-
Měření 2 (kV)	55,50	93,00	65,90	41,70	-
Měření 3 (kV)	58,10	68,80	57,20	43,60	-
Měření 4 (kV)	55,50	84,50	73,00	43,80	-
Měření 5 (kV)	64,30	80,90	76,20	39,90	-
Měření 6 (kV)	55,00	75,70	70,60	48,80	-
U_p (kV)	55,10	83,20	66,50	44,00	-
s (kV)	7,10	10,40	8,40	3,20	-
Std. od/stř (%)	12,90	12,50	12,60	7,20	-
Elektrická pevnost (kV.mm ⁻¹)	22,04	33,28	26,60	17,60	-
Teplota (°C)	26	28	26	26	-
Frekvence (Hz)	60	60	60	60	-

Příloha 3

V tabulkách jsou uvedené vypočítané konstanty pro jednotlivé náhradní funkce popisující dielektrické parametry. Hodnoty pro relativní permitivitu jsou uvedeny pouze na digitálním médiu, kde bylo pro výpočet využito více parametrů a konstant. V tabulkách nejsou uvedené z důvodu využití přibližné náhradní funkce. Uvedené konstanty by postrádaly přesnost.

Tab. 27: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů v počátečním stavu

Počáteční hodnoty	Hodnoty pro rovnici rezistivity			Hodnoty pro rovnici ztr. činitele		
	A	B	R ²	a	α	R ²
FRITO	73047,155	4226,361	0,987	8,174E-09	0,041	0,796
Kukuřičný olej	72873,901	4011,470	0,984	5,716E-09	0,043	0,990
Kyselina linolová	2233,038	4797,335	0,982	2,277E-08	0,043	0,974
Kyselina olejová	1,409	7836,606	0,995	4,718E-13	0,070	0,999
MEŘO	27385,018	2438,800	0,978	1,053E-03	0,024	0,909
Řepkový rafinovaný olej	3655,130	5087,378	0,999	6,719E-09	0,043	0,845
Řepkový nerafinovaný olej	1063,477	4316,407	0,991	1,342E-06	0,037	0,864
Rýžový olej	9231,985	4791,221	0,998	3,118E-09	0,044	0,973
Slunečnicový rafinovaný olej	53851,153	3986,730	0,997	6,259E-08	0,039	0,929
Surový sojový olej	909,201	3998,881	0,991	6,600E-06	0,035	0,910
TRAFO-CZA	1562806,819	4814,613	0,976	3,466E-10	0,039	0,969

Tab. 28: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 100 h dlouhém namáhání

100 h	Hodnoty pro rovnici rezistivity			Hodnoty pro rovnici ztr. činitele		
	A	B	R ²	a	α	R ²
FRITO	17311,045	4191,271	0,988	1,543E-07	0,036	0,972
Řepkový rafinovaný olej	6257,273	3663,299	0,995	1,091E-05	0,032	0,881
Rýžový olej	4884,068	4093,797	0,997	5,652E-07	0,037	0,903
Slunečnicový rafinovaný olej	12183,176	4072,322	0,997	1,867E-07	0,037	0,969
TRAFO-CZA	14301,532	5823,348	0,997	1,645E-11	0,052	0,983

Tab. 29: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 250 h dlouhém namáhání

250 h	Hodnoty pro rovnici rezistivity			Hodnoty pro rovnici ztr. činitele		
	A	B	R ²	a	α	R ²
FRITO	5713,190	4214,517	0,997	2,501E-07	0,038	0,960
Řepkový rafinovaný olej	2038,212	3712,832	0,995	1,583E-05	0,033	0,948
Rýžový olej	1318,215	4335,202	0,998	3,813E-07	0,039	0,923
Slunečnicový rafinovaný olej	3748,891	4727,803	0,998	5,198E-09	0,045	0,947
TRAFO-CZA	562,283	6664,872	0,983	2,942E-11	0,054	0,790

Tab. 30: Vypočítané hodnoty konstant a koeficientů determinace náhradních funkcí pro dielektrické parametry olejů po 500 h dlouhém namáhání

500 h	Hodnoty pro rovnici rezistivity			Hodnoty pro rovnici ztr. činitele		
	A	B	R ²	a	α	R ²
FRITO	742,979	4740,816	0,998	9,266E-08	0,041	0,939
Řepkový rafinovaný olej	402,901	4492,798	0,994	6,449E-07	0,039	0,936
Rýžový olej	508,209	4590,044	0,997	3,015E-07	0,040	0,936
Slunečnicový rafinovaný olej	-	-	-	-	-	-
TRAFO-CZA	92843418,447	3285,210	0,981	2,759E-09	0,036	0,991