

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Diagnostický systém pro studium aplikovatelnosti
alternativních izolačních kapalin**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Jan HÁJEK**
Osobní číslo: **E11N0010P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostický systém pro studium aplikovatelnosti alternativních izolačních kapalin**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Podrobně popište různé druhy alternativních elektroizolačních kapalin se zaměřením na jejich výrobu a možnost použití.
2. Popište degradační mechanismy těchto kapalin se zaměřením na oblast transformátorů.
3. Vyberte a popište parametry, které nejhodněji charakterizují jejich elektrické a neelektrické parametry.
4. Sestavte diagnostický systém na hodnocení alternativních elektroizolačních kapalin pod vlivem rozdílných degradačních mechanismů.
5. Experimentálně ověřte aplikovatelnost diagnostického systému.

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

1. MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Magdaléna TRNKOVÁ a Lumír ŠAŠEK. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie. Praha: BEN - technická literatura, 2011. 120 s. ISBN 978-80-7300-41-5.
4. Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Širůček
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na jednotlivé druhy izolačních kapalin s vysokou biologickou odbouratelností se zaměřením na možnosti aplikovatelnosti těchto kapalin v elektrotechnické praxi. Tyto kapaliny budou porovnány s běžně používaným olejem založeným na minerální bázi. V praktické části je řepkový a slunečnicový olej podroben modifikaci. Na těchto modifikovaných vzorcích a syntetické kapalině MIDEL 7131 budou proměřeny absorpční a resorpční charakteristiky, dále ztrátový činitel v závislosti na teplotě. Výsledky budou následně porovnány s na minerálním olejem SHELL Diala dx.

Klíčová slova

Ztrátový činitel, polarizační index, elektrické stárnutí, tepelné stárnutí, diagnostický systém, biologická odbouratelnost, vliv tepelné expozice.

Abstract

This thesis focuses on the individual types of high biodegradable insulating fluids. They are focusing on the possibility of the applicability of these fluids in electrical engineering practice. These fluids are compared to commonly used mineral based oil. In the practical part is rapeseed and sunflower oil subjected to modification. On these modified samples and synthetic fluids MIDEL 7131 will be measured absorption and resorption characteristics, as well as the loss factor depending on the temperature. The results will be compared with mineral oil SHELL Diala dx.

Key words

Dissipation factor, polarization index, electrical aging, thermal aging, diagnostic system, biodegradability, the effect of heat exposition.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 9.5.2013

Jan Hájek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Širůčkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
1 KAPALNÉ IZOLANTY	11
1.1 MINERÁLNÍ OLEJE	12
1.2 ROSTLINNÉ OLEJE	14
1.2.1 Vysýchavé oleje	15
1.2.2 Nevysýchavé oleje	16
1.2.3 Výroba rostlinného oleje	17
1.3 PERSPEKTIVNÍ ROSTLINNÉ ELEKTROIZOLAČNÍ KAPALINY	21
1.4 IZOLAČNÍ KAPALINY Z ORGANICKÝCH ESTERŮ	24
1.4.1 Syntetické kapaliny	25
2 VYBRANÉ PARAMETRY IZOLAČNÍCH KAPALIN	28
2.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI A IZOLAČNÍ ODPOR	28
2.1.1 Elektrická pevnost	28
2.1.2 Vnitřní rezistivita	29
2.1.3 Ztrátový činitel	30
2.2 FYZIKÁLNÍ PARAMETRY IZOLAČNÍCH KAPALIN	31
2.2.1 Viskozita	31
2.2.2 Barva	31
2.2.3 Bod vzplanutí	32
2.2.4 Bod tuhnutí	32
2.3 CHEMICKÉ PARAMETRY IZOLAČNÍCH KAPALIN	32
2.3.1 Biologická odbouratelnost	32
2.3.2 Oxidační stabilita	32
2.3.3 Číslo kyselosti	33
2.3.4 Obsah vody v oleji	33
2.4 DEGRADAČNÍ MECHANISMY	34
2.4.1 Oxidační stárnutí	34
2.4.2 Tepelné stárnutí	35
2.4.3 Elektrické stárnutí	39
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
3.1 EXPERIMENT	42
3.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ	42
3.2.1 Neutralizace	42
3.2.2 Reesterifikace řepkového oleje	43
3.3 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM	45
3.3.1 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$	47
3.3.2 Postup měření	50
3.3.3 Výsledky a vyhodnocení	51
3.4 MĚŘENÍ ABSORPČNÍCH A RESORPČNÍCH CHARAKTERISTIK	54
3.4.1 Postup měření	55
3.4.2 Schéma zapojení	56
3.4.3 Výsledky měření absorpčních a resorpčních charakteristik	57
3.4.4 Polarizační index	64
3.4.5 Vyhodnocení polarizačního indexu	65
3.4.6 Redukované resorpční křivky (RRK)	65
4 ZÁVĚR	68
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	70

PŘÍLOHY.....**1**

Úvod

Izolační systém má významný vliv na provozní a životnostní charakteristiky zejména vysokonapěťových elektrických zařízení. Za izolační materiál považujeme látku, která neobsahuje volné nosiče elektrického náboje, ani další znečištění či příměsi, a je tedy schopen vhodně elektricky oddělit dvě místa s různým potenciálem. Příměsi jsou vždy příčinou toho, že každý technický izolant má určitou (nežádoucí) nenulovou elektrickou vodivost. S touto skutečností jsme nuceni počítat při volbě izolačního materiálu pro konkrétní použití.

Izolační kapaliny mají asi největší využití u vysokonapěťových transformátorů, kde je izolační systém tvořen olej-papír. Proveden je prostřednictvím lepenky na bázi celulózy a příslušného oleje, který zde plní funkci izolačního a chladícího média. Pro izolační systém jsou důležité parametry, které musí splňovat, aby mohl plnit svou funkci. Mezi ně patří elektrická pevnost, viskozita, ztrátový činitel, izolační odpor, vnitřní rezistivita a polarizační index. Tyto a další parametry jsou ovlivňovány provozními a okolními vlivy. Ty mohou způsobovat degradaci izolačního systému. Působí zde tepelné, elektrické, oxidační, mechanické a další degradační mechanismy. Ty mají za následek zhoršené vlastnosti izolačního systému, což může vést k průrazu izolace a následného poškození zařízení. Proto musíme provádět včasnou diagnostiku.

Nejpoužívanější elektroizolační kapalinou je minerální olej, který je založen na ropné bázi, jeho je struktura tvořena zejména směsí uhlovodíkových molekul. Nastává zde problém se zásobami ropy, které nejsou nevyčerpatelné, dalším problémem je zde biologická odbouratelnost, která se pohybuje mezi 20 % a 40 %. Proto se v současné době výzkum olejů zaměřuje na alternativní kapaliny s vysokou biologickou odbouratelností. Rostlinné oleje se získávají lisováním semen a dřevin, což je obnovitelný zdroj. Disponují také vysokou biologickou odbouratelností, která je více než 90 %.

Minerální oleje mají prozatím lepší vlastnosti, na trhu jsou již kapaliny založené na bázi přírodních esterů, či syntetické kapaliny, které se svými vlastnostmi přibližují olejům minerálním. Tyto kapaliny jsou bohužel cenově náročnější.

1 Kapaln  izolanty

Elektroizolační a dielektrické materiály můžeme rozdělit do tří základních skupin, jimiž jsou plynné, pevné a kapaln . V této diplomové práci se zaměřím na třetí skupinu, kapaln  izolanty. Tyto materiály jsou široce používány v různých odvětvích elektrotechniky. Jejich uplatnění je možno najít u transformátorů, kondenzátorů a kabelů. Kapaln  izolanty nemají pouze izolační schopnost, vyznačují se také dobrou tepelnou vodivostí. Fungují tedy i jako chladicí médium.

Nespornou výhodou kapalných izolantů je jejich tekutost. Díky ní se mohou dostat do vláknité izolace, zaplnit póry v materiálech a dostanou se i mezi závit vlnutí, což zvyšuje elektrickou pevnost. Pokud zamýšlíme použít izolační kapalinu například v transformátorech, budeme volit spíše nižší viskozitu kapaliny. Neboť viskozita značí tření a přitažlivé síly v kapalině. Čím větší viskozita, tím větší tření a přitažlivé síly. To způsobí brzdění kapaliny a omezení chlazení.

Při výběru kapalných izolantů bychom se měli zaměřit předně na odolnost proti oxidaci a stálost těchto látek, což znamená neměnnost vlastností v průběhu používání, oproti počátečnímu stavu. Další důležité vlastnosti, které bereme v potaz při výběru vhodné izolační kapaliny, jsou: vnitřní rezistivita, elektrická pevnost, ztrátový činitel, hustota, viskozita, číslo kyselosti, bod tuhnutí a vzplanutí.

Nejpoužívanější izolační kapalinou v praxi je minerální olej, který je složen ze směsi různých uhlovodíků, vzniklých z lehkých olejů při destilaci ropy. Tyto kapaliny mají však určité nevýhody, například zásoby ropy, které neustále ubývají. Další významný problém je ekologická likvidace. Minerální oleje mají špatnou biologickou odbouratelnost. Ta sebou přináší problém, jak naložit s použitým a nepotřebným materiálem, a také při katastrofách, kde může olej uniknout. Jelikož jsou zařízení využívající minerální oleje v blízkosti lidských obydlí, polí, vodních toků, úniky oleje by mohly mít fatální následky.

Díky výše zmíněným důvodům se vědci začali zaměřovat na alternativy ve formě rostlinných, syntetických, silikonových kapalin a dalších. [1], [11], [13]

1.1 Minerální oleje

Nejpoužívanějšími izolačními kapalinami v elektrotechnice jsou minerální oleje. Nespornou výhodou těchto kapalin je cena a jejich výborné stabilní vlastnosti. Aby si olej zachoval potřebné vlastnosti, je nutné o olej řádně pečovat, musíme ho podrobovat pravidelné diagnostice, abychom mohli zavčas kapalinu regenerovat. Pokud bychom při diagnostice zjistili překročení parametrů udávaných výrobcem, je nutné olej vyměnit, jelikož ztrácí své vlastnosti a mohlo by dojít ke znehodnocení samotného média, tak i zničení jednotlivých částí transformátoru. Degradaci oleje může mít za následek působení elektrických, tepelných nebo chemických vlivů. Studie [2], [15] prokázala, že při správném zacházení, dodržování pravidelných diagnostik se může dosáhnout životnosti více jak 35 let, kdy si olej zachovává požadované vlastnosti. K odhadnutí přibližné životnosti lze použít Arrheniův zákon, který popisuje rychlost stárnutí oleje v závislosti na teplotě. Arrheniův zákon je blíže popsán v kapitole 2.4.1. [2], [15], [17]

Důležitý faktor, který musíme brát v potaz, je obsah organicko-sírných sloučenin. Množství těchto sloučenin závisí na původu surové ropy. Tyto látky je potřeba pomocí rafinace odstranit nebo alespoň zredukovat jejich množství ve finálním produktu. Například obsažení korozivní síry je nežádoucí jev, jelikož má vysoké korozivní účinky vůči kovovým materiálům, jako je měď a ocel. To je poměrně značný problém, neboť tyto dva materiály jsou základem při výrobě transformátoru. [3]

Minerální izolační oleje jsou směsí různých uhlovodíků (sloučeniny uhlíku a vodíku), které vznikají z lehkých olejů při destilaci ropy. Uhlovodíky jsou látky, jejichž molekuly jsou tvořeny různě dlouhými řetězci atomů uhlíku C, na které jsou navázány atomy vodíku H. Skládají se jednak z alifatických sloučenin s obecným vzorcem C_nH_{2n} , jednak ze směsi lineárních řetězců. Ty mohou být různě rozvětvené, cyklické nebo také částečně cyklické. Značné množství olejů obsahuje vysoký podíl aromatických sloučenin souvisejících s benzenem, naftalenem a s deriváty těchto alifatických postranních řetězců. Poměr aromatických složek k alifatickým záleží na zdroji oleje a jeho následném ošetření rafinací. Procentuelní podíl aromátů je důležitý pro vstřebávání plynu nebo hodnocení vlastností z hlediska elektrických výbojů a oxidačních vlastností. [1], [4]

Výrobní proces minerálních olejů má následující kroky:

- Odstranění hrubých nečistot, anorganických solí a vody
- Atmosférická destilace
- Vakuová destilace

- Rafinace.
- Odparafinování.
- Dorafinace.
- Případné přidávání přísad (aditiv) pro zlepšení vlastností.

Vlastností minerálního oleje není jen elektroizolační a chladicí schopnost v transformátorech, vysokonapětových průchodkách, ale také i jako zhášecí a protikorozní prostředek ve vysokonapětových spínačích.

Minerální oleje můžeme rozdělit dle použití:

- Transformátorové.
- Kabelové.
- Kondenzátorové.
- Spínačové.

Jednotlivé skupiny se především liší ve viskozitě. U transformátorového oleje požadujeme malou viskozitu, z důvodu chlazení a proniknutí kapaliny mezi závity. U kabelových olejů je tomu jinak. Vlastnosti závisí především na konstrukci kabelů a požadovaných parametrech oleje. Ke konstrukci kabelu se vztahuje především viskozita oleje. Z toho důvodu se používá široké rozpětí, například od 2,5 mm²/s do 25,5 mm²/s při 100 °C. Především požadujeme co nejmenší index viskozity, z důvodu impregnace, naopak hustý v provozu, aby nedocházelo ke stékání izolačního media do míst nejhluběji položených. Požadavek na malé dielektrické ztráty je srovnatelný jako u transformátorového oleje. Dále požadujeme velký měrný odpor, minimálně 10⁹ Ω/m při 100 °C, velkou elektrickou, plynovou a oxidační stálost. Kondenzátorový olej se používá například pro impregnaci papíru, který plní funkci dielektrika. [5], [14], [15]

Parametr	Minerální olej		
	Transformátorový	Olejevé kabely, Kondenzátory	Kabely
Specifická hmotnost	0,88	0,885	0,93
Viskozita při 37,8°C	57-59	0,1	100
Bod vzplanutí [°C]	135	165	235
Bod hoření [°C]	148	185	280
Bod tuhnutí [°C]	-45	-45	-5
Měrné teplo [cal/kg]	0,425	0,412	-
Koeficient roztažnosti [K ⁻¹]	0,0007	-	0,00075
Tepelná vodivost [W/m K]	0,39	-	-
Elektrická pevnost [kV/mm]	30	-	-
Permitivita při 25°C	2,2	-	-
Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12}$]	1,0-10	50-100	1,0-10

Tab. 1: Zobrazuje charakteristické vlastnosti minerálních olejů. [5]

1.2 Rostlinné oleje

Uvážíme-li výše zmíněné problémy s minerálními oleji, je nutné se zaměřit na alternativní řešení dlouhodobého charakteru, která by mohla časem nahradit stávající minerální oleje. Přišla myšlenka, otestovat rostlinné oleje, které se doposud využívaly především v gastronomickém odvětví, či jako masážní oleje. Následné výzkumy poukázaly na další využití těchto kapalin. Je zde několik nesporných výhod, které staví rostlinné oleje do role konkurenta vůči minerálním olejům. Podstatnou výhodou těchto kapalin, je biologická odbouratelnost, která je několikanásobně vyšší, než je tomu tak u minerálních olejů. Pokud by olej tedy unikl, nemuselo by se jednat o biologickou katastrofu. Další vlastností, kterou rostlinné oleje převyšují minerální, je bod vzplanutí. Neboli teplota, při které se olej vznítí. Zde má navrch rostlinný olej, který převyšuje minerální oleje a desítky stupňů.

Jedno z prvních experimentálních použití se datuje okolo roku 1990, kdy byl použit rostlinný olej v silových kondenzátorech.

Rostlinné oleje jsou tvořeny směsí glycerinů, esterů, nenasycených a nasycených mastných kyselin. Tyto oleje získáváme lisováním semen olejnatých rostlin nebo olejnatého dřeva. Následně po lisování musí přijít na řadu rafinace. Rafinace je technologický postup, kde se olej vyčistí od nežádoucích složek, jakožto například nečistoty, které by mohli snižovat elektrickou pevnost. Surový olej má tmavou barvu a obsahuje pevné částice (proteiny a vlákna) a kapaliny (tuky a olej). Tuky a olej jsou triglyceridy esterů mastných kyselin a obsahují poměrně vysoké procento nasycených triglyceridů. To by mohlo mít za následek

ztuhnutí již pod pokojovou teplotou. Mastná část může zůstat jako kapalina až okolo 0 °C. Oleje s vysokou nenasyceností mohou zůstat jako kapalina až do teplot pohybujících se od -15 °C do -30 °C. To nás může značně ovlivnit při uplatňování jednotlivých olejů do různých odvětví elektrotechniky. Například pokud by olej obsahoval velké procento nasycených triglyceridů, nemohli bychom tento olej použít v transformátorech. Z jednoduchého důvodu, pokud by olej mohl ztuhnout pod pokojovou teplotou, přestal by plnit funkci chladícího media, a to by mohlo mít za následek poškození transformátoru. Tyto oleje by mohly být použity například k impregnaci materiálů v kondenzátorech.

Z pohledu elektrotechniky lze rostlinné oleje dělit na dvě základní skupiny podle toho, jak se chovají vůči kyslíku, obsaženému ve vzduchu, teplu a světlu, na vysýchavé nevysýchavé.[11], [13]

1.2.1 Vysýchavé oleje

Vysýchavé oleje mají charakter tvrditelných hmot, tj. termoreaktivní. To znamená, že pokud se látka dostane do styku se vzduchem za působení světla a tepla, přechází do tuhého stavu. Tenká vrstva oleje na povrchu nějaké hmoty vysychá a vytváří lesklou a tvrdou hmotu, která má dobré elektrické vlastnosti, pevně lpí na podkladu. Vysychání je proces, při kterém dochází k polymeraci vrstvy v důsledku oxidační reakce. Jelikož během tohoto procesu dochází ke změně skupenství části látky, výsledná hmotnost oleje se zvýší. K vysychání olejů jsou zapotřebí kyslík, který je obsažen ve vzduchu. Schnutí olejů je současnou oxidací a polymerizací. Tato vlastnost je zapříčiněna přítomností mastných kyselin, které mají nenasycené vazby. Obsazení mastných kyselin je znázorněno v Tab. 2:. Rychlost vysychání olejů můžeme urychlit teplotou, působením světla, ale i přítomností katalyzátorů (urychlovačů) zrychlujících vysušování, tzv. sušidel. Filmy vysýchavých olejů jsou stále proti působení rozpouštědel, i proti transformátorovému oleji. V teplém stavu odolávají těžším uhlovodíkům. Výsledný film vysušeného oleje je teplotně odolný. Z tohoto důvodu jej můžeme považovat za hmoty tvrditelné.

V této kategorii, oleje vysýchavé, je nejpoužívanější olej lněný a olej tungový, neboli také dřevný. Olej lněný se získává ze semen lnu. Tungový, neboli také dřevný olej se získává lisováním semen tungového stromu.

Pokud bychom chtěli tyto dva oleje porovnávat, lépe vyjde olej tungový, jelikož rychleji schne v poměrně tlustější vrstvě. Naproti tomu olej lněný schne pouze od povrchu, přičemž

jeho vrstva má větší odolnost vůči vnikání vody, proto se používá i pro impregnaci dřeva. Avšak nevýhodou tungového oleje je jeho tepelné stárnutí, při kterém křehne, praská a odlupuje se od povrchu, na který byl nanesen. Při vhodném zpracování můžeme použít i olej ricinový. Tyto oleje v elektrotechnice používáme hlavně pro výrobu elektroizolačních laků, které slouží k vytvoření elektroizolačních, mechanicky i tepelně odolných povlaků [1].

Dalším významným zástupcem vysýchavých olejů je olej vyráběný ze **slunečnice**. Ta je díky své nenáročnosti na místo výskytu velice rozšířená. Ukázalo se, že tento olej je 100% šetrný k životnímu prostředí, a proto modifikovaná verze je již používána v transformátorech. [16] V několika zemích se ukázalo, že by tento druh rostlinného oleje mohl zcela nahradit minerální, syntetické a silikonové oleje. [6]

1.2.2 Nevysýchavé oleje

Zástupcem nevysýchavých olejů je olej ricinový, jenž se získává ze semen skočce, je tekutým polárním izolantem. Díky jeho vysoké permitivitě ($\epsilon_r = 4-5$) a nejedovatosti se používá k napouštění papírových kondenzátorů, především pro stejnosměrné obvody [1].

Jako příklad uvedu parametry řepkového, které se nacházejí v Tab. 3:. V této tabulce jsou porovnány hodnoty surového řepkového oleje a oleje rafinovaného, což jak již bylo výše zmíněno, je olej vyčištěný technologickým postupem. Jak můžeme v tabulce vidět, olej rafinovaný má světlejší barvu a mnohem nižší kyselost. Například průrazné napětí je téměř třikrát větší u rafinovaného oleje než u surového. Bod vzplanutí u řepkového izolačního oleje byl 325°C, což je téměř dvojnásobná hodnota, než je u běžného minerálního oleje. Dipolární charakteristika molekul esteru vytváří vyšší hodnoty permitivity ϵ_r a ztrátového činitele $\text{tg}\delta$, než u minerálních olejů.

Obsažení mastných kyselin vybraných rostlinných olejů				
Rostlinný olej	Nasycené mastné kyseliny[%]	Nenasycené mastné kyseliny[%]		
		Mono-	Di-	Tri-
Řepkový olej	7,9	55,9	22,1	11,1
Kukuřičný olej	12,7	24,2	58	0,7
Arašídový olej	13,6	17,8	51,8	0,2
Olivový olej	13,2	73,3	7,9	0,6
Sojový olej	14,2	22,5	51	6,8
Slunečnicový olej	10,5	19,6	65,7	-

Tab. 2: Zobrazuje obsah mastných kyselin vybraných rostlinných olejů [7]

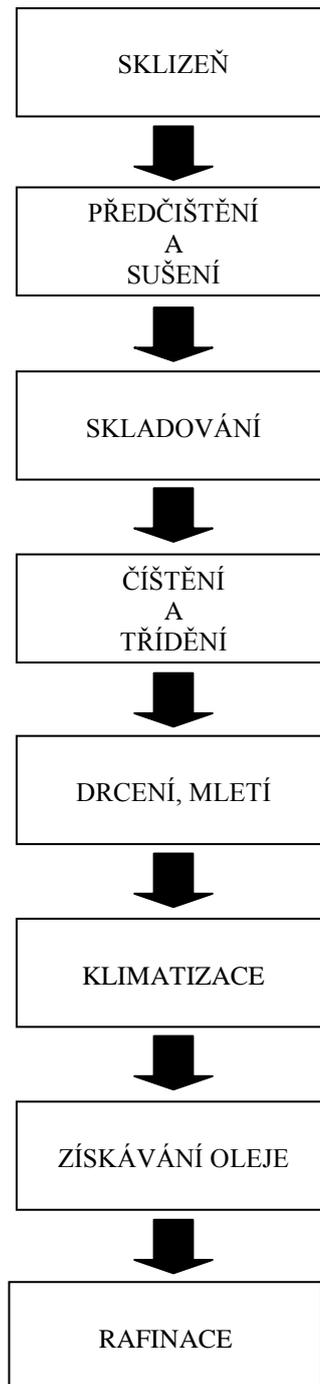
Chemické a fyzikální vlastnosti řepkového oleje před a po rafinaci		
Parametr	Originál	Rafinovaný
Barva	Tmavě žlutá	Světle žlutá
Hustota při 20 °C [kg/m ³]	0,9	0,9
Viskozita při 40 °C [mm ² /s]	44,2	43
Bod tuhnutí [°C]	-17	-18
Bod vzplanutí [°C]	-	325
Kyselost [mgKOH/g]	0,6	0,03
PH	4,3	5,6
Chemické složení	Ester	
Průrazné napětí [kV]	24,3	73
tanδ při 90 °C [%]	17,3	0,75
Měrný odpor při 90 °C [Ω/m]	9·10 ⁸	2·10 ¹⁰
ε _r při 90 °C	2,93	2,93
Povrchové napětí [mN·m]	15	30

Tab. 3: Zobrazuje chem. a fyz. vlastnosti řepkového oleje před a po rafinaci.[7]

V dnešní době se výzkum zaměřuje na využití biologicky odbouratelných olejů v transformátorech. Jednou z firem zabývajících se biologicky odbouratelnými oleji je firma COOPER se svým produktem FR3.

1.2.3 Výroba rostlinného oleje

Samotný proces výroby olejů se skládá z několika kroků, a to od sklizně suroviny až po samotné získání oleje, který se následně upravuje. Na Obr.1: je znázorněn postup při výrobě rostlinného oleje.



Obr. 1: Schéma výroby rostlinných olejů [9], [12].

Proces zpracování olejnin

Období sklizně se u jednotlivých olejnin liší, jsou zpracovány průběžně. Z tohoto důvodu je důležité skladování. Zde je cílem uchování jakosti zboží a jeho hmotnosti. Dnes se využívají k uskladnění komorové sklady, tzv. sila. Skladujeme při teplotě do 20°C a relativní

vlhkost vzduchu nejvýše 70 %.

Před uložením do skladů je nutné semena předčistit, zde se zbavují hrubých nečistot a příměsí. Dále musíme semena vysušit, aby nebyl obsah více než 8 – 10 % vlhkosti, mohlo by dojít k nežádoucím změnám v semenech. Z důvodu správné vlhkosti musíme zajistit správné odvětrání. Než přistoupíme k samotnému získávání oleje, musíme semena podrobit čištění. K tomu to slouží síťové čističky, kde čištění probíhá na základě velikosti. Dále můžeme použít aspirátory, které odfouknou lehké částice. Některé druhy semene musí podstoupit také proces odslupkování.

Po odstranění nečistot přichází fáze drcení a mletí. Tento proces je nezbytný kvůli rozrušení buněčných stěn a otevírání olejových buněk. Tato část procesu se provádí mezi otáčejícími se válci.

Poslední fáze před samotným získáním oleje je klimatizace. Je to proces, ve kterém se rozdrčená semena zahřejí na určitou teplotu a souběžně s tím, se upravuje obsah vody. Klimatizace se provádí párou o teplotě 80 °C – 110 °C, zde se snižuje viskozita oleje. [9,12]

Získávání oleje

Existují tři základní způsoby, kterými je možno získat olej. Lisováním, extrakcí a kombinací obou metod. Výsledkem těchto postupů je surový olej. Ten je ovšem pro elektrotechnické účely nevhodný, díky nečistotám obsažených v tomto oleji. Z tohoto důvodu je nutné podrobit surový olej dalším technologickým postupům. [9]

Lisování

Metodu lisování je možné rozdělit na **lisování za studena** a na **lisování za tepla**. První uvedená metoda vyprodukuje menší množství oleje, olej má však vysokou kvalitu. Oproti tomu lisovaná za tepla vyprodukuje větší množství oleje, ovšem s mnohem menší kvalitou. Pro využití v elektrotechnice využíváme lisování za studena, abychom dosáhli co největší kvalitu oleje.

Tato metoda využívá vysokého tlaku k získání oleje ze semen. Dle použitého tlaku rozlišujeme předlisy, kdy se používá tlak o velikosti 5 – 16 MPa a tuk v pokrutinách (zbytky po lisování), kdy se tlak snižuje na 17 – 19 % a dolisy, kdy tlak stoupne až na hodnotu 40 MPa a obsah tuku v pokrutinách klesá na 8 – 9 %. Metoda lisování se používá pro olejiny s vyšším obsahem tuku (minimální hranice 25 – 30 %). K tomuto slouží šnekové hydraulické

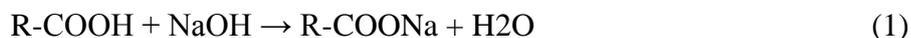
lisy. Vzniklé pokrutiny se mohou využít pro zkrmování, či jako paliva pro topení. [9,10,12]

Rafinace surového rostlinného oleje

Rafinace je technologický proces, při kterém se snažíme zvýšit kvalitu surového oleje. Požadujeme odstranění nežádoucích látek. Tyto látky můžeme rozdělit na rozpustné a nerozpustné. Látky nerozpustné se mohou v oleji usazovat a znehodnocovat tím olej. Například nerozpustné látky mohou snižovat elektrickou pevnost. Látky rozpustné, mezi které patří mastné kyseliny, zvyšují kyselost oleje. Nejdůležitějším procesem rafinace je odkyselování, které odstraňuje volné mastné kyseliny. Tento proces je možné provést několika způsoby [10], [12]:

1. Neutralizace
2. Destilace
3. Esterifikace

K **neutralizaci** volných mastných kyselin můžeme použít hydroxid sodný (NaOH). Volné mastné kyseliny reagují se zásadou a při této reakci vzniká voda a sůl kyseliny. Na rozhraní soli kyseliny vzniká usazenina, kterou je nutné odfiltrovat. Vzniklá voda se vysuší. Tato reakce je zobrazena v rovnici (1) [10].



Proces **destilace** použijeme u olejů, které se vyznačují velkým množstvím volných mastných kyselin. K oleji přivedeme přehřátou páru. Vytvoří se vakuum, které způsobí přeměnu vody v oleji na páru, tu následně od směsi odstraňujeme. Pomocí tohoto procesu se odstraní jak volné mastné kyseliny, tak další nežádoucí látky obsažené v oleji. [10]

Další metoda odstraňující volné mastné kyseliny, se nazývá esterifikace. Esterifikaci používáme u olejů s vysokou jakostí. Jedná se zde o reakci alkoholu s kyselinou za vzniku esteru vody. Pro výrobu methylesteru řepkového oleje (MĚŘO) se využívá proces transesterifikace.

Tento proces mísí hydroxid sodný s metanolem a následně vylisovaným olejem, získaným z řepky olejné. Při výrobě oleje MĚŘO je vedlejším produktem glycerinová fáze, které se využívá pro další zpracování. [10]

1.3 Perspektivní rostlinné elektroizolační kapaliny

Zastoupení rostlinných olejů, které přichází v potaz při používání v elektrotechnice, je poměrně velké množství. Můžeme uvést několik příkladů: sojový olej, kokosový olej, slunečnicový olej, olivový olej, palmový olej, tungový olej, řepkový olej a olej ze semene Moringa. [6,12]

Z těchto názvů je zřejmé, že ne každá země si může vybírat, na jaký olej se může zaměřit, jelikož klimatické podmínky jsou všude ve světě různé. A ne v každé zemi lze pěstovat například palmový olej. V našem podnebném pásu připadají v úvahu jen slunečnice, len setý a řepka olejná. Především se zaměřujeme na řepku olejnou, jelikož cena slunečnicového oleje je vyšší.

Ve spojených státech se společnost Nebraska Public Power District, dále jen NPPD, zabývá využitím sojového oleje v transformátorech. Produkt společnosti NPPD se jmenuje BIOTRANS a je šetrný k životnímu prostředí. Standardní distribuční soustavy transformátorů jsou spíše vyplněny kapalinou založenou na sojovém oleji než na oleji minerálním. Transformátory BIOTRANS nabízí mnoho výhod oproti transformátorům naplněným minerálními oleji. Výhodou je ekologická odbouratelnost, kde při úniku, nehodě, nehrozí žádná ekologická katastrofa. Jedná se o obnovitelný zdroj, rozvoj zemědělství. Dále je bezpečnější s ohledem na bod vzplanutí, který má vyšší než oleje založené na ropné bázi. Transformátory BIOTRANS mají menší náklady na provoz a je zde možnost recyklace. Není třeba řešit problematiku, jak likvidovat nebezpečné odpady.

Společnost ABB vyvinula pokročilou dielektrickou kapalinu jménem BIOTEMP. Ten byl vytvořen modifikací rostlinných olejů tak, aby byl šetrný k životnímu prostředí a zároveň měl dobré jak elektrické, tak fyzikální a chemické vlastnosti. BIOTEMP neobsahuje žádnou naftu, halogeny, silikony, korozivní síru ani žádné jiné prvky, které by mohly být nebezpečné životnímu prostředí. Tato kapalina má výbornou teplotní stabilitu a velmi vysoký bod vzplanutí a hoření. Bod tuhnutí je mezi -15 °C a -25 °C , kde se dále nerozšiřuje zmražením, nýbrž zůstává ve formě tuhého gelu, který má stále obě funkce, a to jak chladicí, tak izolační. BIOTEMP byl zchlazen na -70 °C , bylo přivedeno plné napětí. Toto plné napětí bylo udržováno do běžné provozní teploty, která činí 65 °C . BIOTEMP se stal z pevného gelu zpět kapalným bez jakéhokoliv poškození. Naopak bod vzplanutí je velmi vysoký, pohybuje se okolo 330 °C . BIOTEMP je vysoce kompatibilní s tuhými izolačními materiály. Kapalina BIOTEMP je velmi dobře biologicky odbouratelná, a to ve velmi krátkém časovém úseku. V časovém úseku 21 dní je procentuelní biologická odbouratelnost až 97%. Prakticky se

používá již v malých a distribučních transformátorech napříč USA. Tato kapalina má prokazatelnou úspěšnost. Používá se jak v hustě obydlených oblastech, tak i například v tropických oblastech na Havaii nebo na chladných severních svazích Aljašky. [30]

Dalším zástupcem rostlinného oleje je olej kokosový, který je původem ze Srí Lanky. Kokosový olej byl zkoumán z hlediska využití v transformátorech. Byl zkonstruován experimentální transformátor 5 kVA, na kterém se zkoumaly vlastnosti kokosového oleje. Studie prokázala potřebné elektrické vlastnosti, ale také biologickou odbouratelnost. Pokud vezmeme v potaz dobré elektrické vlastnosti, šetrnost k životnímu prostředí, plus ekonomické hledisko. Což plyne z dostupnosti kokosového oleje na Srí Lance, jelikož je domácím produktem. Z tohoto důvodu vidím toto řešení jako životaschopné.

Dalším alternativním zdrojem z této oblasti, tedy Srí Lanka a Indie, je rostlinný olej získávaný ze stromu Pongamia. Ten se jako většina těchto olejů používá v potravinářském průmyslu. Díky jeho dobrým vlastnostem byl podroben výzkumu. Ten měl prokázat potřebné izolační a chladicí vlastnosti kapaliny. Byl vyvinut olej s názvem MEKO. Vlastnosti tohoto oleje byly porovnány s rozšířenějšími oleji, a to s MIDEL 7131 a R.temp. Vědci zjistili, že fyzikální a chemické vlastnosti MEKO jsou srovnatelné s MIDEL 7131 a R.temp. kapalinou. Další provedená studie, zrychlené stárnutí, prokázala, že methyl ester má větší chemickou stabilitu i bez inhibitoru k oxidaci než ester. A přitom rozsah stárnutí je mnohem menší než u minerálních olejů, MIDEL 7131 a R.temp. kapalina. [6]

Ekologicky šetrný je také **Palmový** olej, jenž je domácím produktem Malajsie. Tento produkt je v Malajsii velice rozšířen a vyskytuje se v hojném počtu, proto má tento rostlinný olej v Malajsii budoucnost, jak z důvodu environmentálních, tak především díky své hojnosti, jelikož ta může zaručit udržitelnost oleje.

Surový Palmový olej se musí přefiltrovat, jelikož obsahuje velké množství nečistot. Tyto nečistoty mohou způsobit výskyt průrazného napětí. Proto se musí surový palmový olej filtrovat pomocí pěti mikrometrových filtrů. Po filtraci byl olej podroben testům podle normy ASTM.

Hodnoty z těchto testů najdete v Tab. 4:.

Palmový olej v porovnání s Minerálním olejem				
Zkouška	Limit	Testovaný olej		
		RBD Palmový olej	Surový Palmový olej	Minerální olej
Zakalení při pokojové teplotě[-]	0,1-900	3,12	>900	0,535
Elektrická pevnost [kV/mm]	30/50	75	23	45
Bod vzplanutí min [°C]	200	>220	206	185
Bod hoření min [°C]	180	>220	195	145
Relativní hustota při 15°C max	0,96	0,9	0,87	0,89
Viskozita při 100°C	-	15	12	3
Viskozita při 40°C		50	48,5	12
Viskozita při 0°C		500	400	300
Tepel. vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,2	0,17	0,16	0,123
Teplotní odpor [$m^2 \cdot C/W$]	-	5,86	6,16	-
Visuální vyšetření		Žlutá	Červená	Žlutá
Obsah vlhkosti [%]	0,01	0,08	0,16	0,1

Tab. 4: Zobrazuje porovnání Palmového oleje s olejem minerálním.[6]

Vlastnosti palmového oleje by mohly být oceněny v elektrotechnickém průmyslu. Procentuální podíl volných mastných kyselin (FFA) palmového oleje RBD (kde zkratka **RBD** znamená – **R**afinovaný, **B**ělený, **D**eodorizovaný) je 0,01 %. Surový palmový olej, jak je získán z továrny, obsahuje 5 %. Tyto hodnoty jsou v souladu procentuální hodnotou FFA rostlinných olejů. Z Tab. 4: lze vidět vztah mezi zakalením a průrazným napětím. Palmový olej RBD má menší zákal. Průrazné napětí je více jak trojnásobné než u surového palmového oleje. To dokazuje, že pokud bychom začali čistit surový palmový olej, mohli bychom docílit vyšších hodnot průrazného napětí. Obsah vlhkosti je 0,08 %, limit je 0,01 %, ovšem průrazné napětí je stále 75 kV/mm. Uplatnění by mohlo být v transformátorech 11 kV a 33 kV, kde při poruše stoupne napětí na 2,5 násobek, což by mohlo být pro tento olej adekvátní. Díky vysokému bodu vzplanutí můžeme použít kapalinu i tam, kde je očekávána vysoká provozní teplota. Limit pro většinu aplikací je 100 °C. Barva a relativní hustota jsou v normě. Viskozita při různých teplotách dokazuje, že je možné použít tento druh oleje jako dielektrickou kapalinu.

Bohužel cena palmového oleje RBD je 4x vyšší než cena například slunečnicového nebo řepkového oleje, čili pro běžné využití bychom museli čistit surový olej pouze filtrací, tím snížit zákal a snížit i energetické náklady na výrobu. [6]

1.4 Izolační kapaliny z organických esterů

Donedávna existovalo jen několik málo aplikací, kde bylo možné využít organické estery. Především se jednalo o kondenzátory. Tyto kapaliny mají poněkud vyšší permitivitu, v rozmezí 4-7, závisující na poměru esterové skupiny a na délce uhlovodíkového řetězce. Jejich vodivost je o něco vyšší než u ostatních izolačních kapalin. Sloučeniny snadno podléhají hydrolýze s vodou, za vzniku kyselin a alkoholů, proto by měla být kapalina udržována suchá, obzvláště při zvyšující se teplotě. Jejich tepelná stabilita je špatná. Konkrétně dibutylsebecinát byl použit ve vysokofrekvenčních kondenzátorech. [4]

V dnešní době se výzkum zaměřuje na využití těchto kapalin v oblasti transformátorů. Jednou z nejvýznamnějších firem v tomto odvětví je firma COOPER POWER SYSTEM, která na trh přivedla rostlinný olej ENVIROTEMP FR3. ENVIROTEMP FR3 je vyroben na bázi 100 % přírodních esterů z rostlinných olejů. Byl vytvořen jako izolační a chladicí medium pro distribuční transformátory, kde je nejčastěji používán, a mohou se zde uplatnit jeho výborné vlastnosti z hlediska požární bezpečnosti, elektrických i chemických vlastností, a také biologické odbouratelnosti, která je větší než 95 %. Základ FR3 je z rostlinného oleje, jeho vlastnosti jsou vylepšeny přidáním aditiv. Neobsahuje však žádné halogeny, ropné prvky, silikony, žíravé síry nebo jakékoli materiály, které by mohly poškozovat životní prostředí. Kapalina není jedovatá, netoxická. Její zelený odstín ji odlišuje od minerálních olejů na ropné bázi. FR3 má velmi vysoký bod vzplanutí, který se pohybuje okolo 330 °C, což řadí tuto tekutinu na první místo v kategorii organických esterů. V dnešní době není k dispozici dielektrická tekutina s vyšším bodem vzplanutí. FR3 je vhodný pro nově upravené transformátory, ale je kompatibilní i se standardními transformátory. [8]

Vlastnosti kapaliny ENVIROTEMP FR3	
Elektrické vlastnosti	
Elektrická pevnost, 2 mm [kV]	≥35
Ztrátový činitel při 25 °C [%]	≤0,2
Ztrátový činitel při 100 °C [%]	≤4
Odplyňování [μl/min]	≤0
Fyzikální vlastnosti	
Barva [ASTM jednotky]	≤1
Vzhled	světlý a jasný
Viskozita při 40°C [mm²/s]	≤50
Viskozita při 100°C [mm²/s]	≤15
Bod vzplanutí [°C]	≥275
Bod tuhnutí [°C]	≤-10
Relativní hustota [15°C/15°C]	≤0,96
Chemické vlastnosti	
Obsah vody [mg/kg]	≤200
Kyselost [mgKOH/g]	≤0,06
Žíravá síra	není korozivní
Obsah PCB [ppm]	neobsahuje

Tab. 5: Zobrazuje základní vlastnosti kapaliny ENVIROTEMP FR3.[8]

1.4.1 Syntetické kapaliny

Vývoj syntetických kapalin začal již ve třicátých letech dvacátého století. Zde se využívaly nejčastěji syntetické chlorované difenyly a chlorované benzeny (askarely). Uplatnění našly především v kondenzátorech a transformátorech, kde byly použity jednak jejich dobré dielektrické vlastnosti, jednak jejich nehořlavost. Povoleny byly však pouze do poloviny roku 1970, kdy bylo jejich používání ve většině zemí zakázáno. Byla zjištěna toxicita a nízká biologická odbouratelnost syntetických kapalin. Pokud nějaké zařízení obsahuje výše zmíněné kapaliny, které se běžně označují jako PCB, musejí být vyřazeny z provozu. Jelikož byly tyto kapaliny hojně využívány, nastal problém s odstraněním po uplynutí životnosti. Jsou předepsány speciální postupy při likvidaci těchto materiálů, jelikož při spalování je nebezpečná kyselina HCl. Metody odstraňování pevného materiálu, například papír nasycený PCB, nebylo zatím přesně specifikováno.

V dnešní době byly vyvinuty syntetické kapaliny, které mají podobné vlastnosti jako

oleje minerální, nějaké i lepší, viz MIDEL 7131 níže uvedený. Navíc jsou biologicky odbouratelné, což představuje velký krok kupředu oproti předchůdcům z poloviny 20. století. Nově navržené kapaliny jsou již hojně využívány v kondenzátorech a transformátorech pro velmi vysoká napětí. Tyto kapaliny obsahují aromatické uhlovodíky (benzen), z nichž některé mají výbornou odolnost vůči částečným výbojům. Dále bychom měli zmínit jejich teplotní odolnost, kde bod vzplanutí může být větší než 300 °C. [4], [31]

Kapalina MIDEL 7131, dále jen MIDEL, je dielektrická kapalina založená na syntetické bázi esterů. MIDEL se používá globálně již více jak 30 let. Jeho využití je především pro transformátory, kde zabezpečuje izolaci a chladící medium. Produkt byl vyvinut s kladením nároků především na zajištění bezpečnosti. Je to vynikající alternativa proti minerálním olejům. Možnost využití je jak pro venkovní transformátory, tak pro vnitřní umístění. MIDEL zajišťuje zvýšení požární bezpečnosti, velikou toleranci z hlediska vlhkosti. Je velmi dobře biologicky odbouratelná. Testy, které jsou v příložené Tab. 6:, ukazují na velmi dobré dielektrické vlastnosti, které předurčují tuto kapalinu pro široké využití v oblasti transformátorů.

MIDEL 7131 má široké použití, lze jej využívat například v distribučních, výkonových a usměrňovacích transformátorech. Dále jej můžeme nalézt v nabíječkách nebo v tyristorovém chlazení. Široký rozsah použití není ovšem jediná výhoda této kapaliny. Je zařazen v nejvyšší požární třídě z hlediska bezpečnosti, kde je bod hoření přes 300 °C. Je robustní a stabilní při vysokých teplotách po dlouhou dobu. Není toxický a je plně biologicky odbouratelný. Disponuje vysokou oxidační stabilitou. V neposlední řadě je velikou předností vysoká elektrická pevnost, která je přes 75 kV/mm. [32]

Testy, jejichž výsledky jsou v příložené Tab. 5:, ukazují na velmi dobré dielektrické vlastnosti, které předurčují tuto kapalinu pro široké využití v oblasti transformátorů a kondenzátorů.

Vlastnosti kapaliny MIDEL 7131	
Elektrické vlastnosti	
Elektrická pevnost [kV]	≥75
Ztrátový činitel při 90°C a 50Hz [-]	<0,008
Resistivita při 90°C [GΩ/m]	>30
Fyzikální vlastnosti	
Barva [HU jednotky]	125
Vzhled	jasná, bez usazenin a sedimentu
Viskozita při 40°C [mm ² /s]	28
Viskozita při -20°C [mm ² /s]	1400
Bod vzplanutí [°C]	260
Bod hoření [°C]	316
Bod tuhnutí [°C]	-60
Krystalizace	NE
Relativní hustota při 20°C [kg/dm ³]	0,97
Chemické vlastnosti	
Obsah vody [mg/kg]	50
Kyselost [mgKOH/g]	0,01
Obsah PCB [ppm]	neobsahuje

Tab. 6: Zobrazuje základní vlastnosti kapaliny MIDEL 7131. [32]

2 Vybrané parametry izolačních kapalin

Vlastnosti izolačních kapalin můžeme rozdělit do tří kategorií. A to na **elektrické**, **fyzikální** a **chemické** vlastnosti. Dle těchto vlastností se dále rozhodujeme pro konkrétní aplikaci kapaliny. Další dělení je možné například do jednotlivých tříd podle bodu vzplanutí. V následujících podkapitolách se pokusím vysvětlit vybrané parametry, které jsou dle mého názoru jedny z nejdůležitějších.

2.1 Elektrické vlastnosti a izolační odpor

Pod pojmem elektrické vlastnosti si můžeme představit mnoho parametrů. Vybral jsem, dle mého názoru, tři nejvíce používané parametry. A to elektrickou pevnost, vnitřní rezistivitu a ztrátový činitel.

Veličinu, kterou je potřeba zmínit, je izolační odpor materiálu, což je přímo určená hodnota okamžitého odporu, vypočítaná z přiloženého napětí a procházejícího proudu. Tato hodnota není převáděna na rozměry zkoušeného předmětu.

$$R_{iz} = \frac{U}{I_{60}} \quad (2)$$

kde R je odpor [Ω],

U je napětí [V],

I je absorpční proud změřený v 60 s [A].

2.1.1 Elektrická pevnost

Jednou z nejdůležitějších vlastností, kterou bereme v potaz při výběru izolační kapaliny pro danou aplikaci, je elektrická pevnost. Pokud bychom zvolili špatnou elektrickou pevnost, dojde k průrazu nebo přeskoku, který může poškodit nebo také zničit dané zařízení. Vezme-li v úvahu ceny transformátorů, může to mít fatální následky.

V našem případě se jedná o přeskok, jelikož u kapalin a plynů jsou to jevy vratné. Zde se po zrušení elektrického pole elektroizolační schopnost obnoví. U plynů je to mnohem kratší doba, díky uskupením částic. V kapalných izolantech vznikají při elektrickém oblouku zplodiny, nejčastěji saze, což mohou být vodivé částice. Proto se mezi jednotlivými měřeními

musí dodržovat pauza, řádově několik desítek minut. K průrazu dochází v pevných izolantech, kde se jedná o zničení izolačního prvku.

Elektrická pevnost je definována jako průrazné napětí U_p vztažené na tloušťku izolantu d . Jedná se vlastně o intenzitu elektrického pole a značí se E_p . Základní jednotkou je V/m, častěji se ovšem používá kV/mm. [19]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (3)$$

kde E_p je elektrická pevnost [kV/mm],

U_p je průrazné napětí [V],

d je vzdálenost elektrod [mm].

Pro měření kapalin se používají hříbové elektrody. Tento tvar se používá kvůli vzniku částečných výbojů a korony. Tyto jevy vznikají na místech s vysokým gradientem, proto zaoblené hrany. Vzdálenost jednotlivých elektrod je normou dána na 2,5mm.[19]



Obr. 2: Měřicí přístroj Bdv Dielectric Oil Breakdown Voltage Testing Equipmen.[18]

2.1.2 Vnitřní rezistivita

Pro praktické účely používáme hodnocení materiálů z hlediska jejich elektrické vodivosti, hodnoty měrného elektrického odporu (rezistivity – ρ) a měrné elektrické vodivosti

(konduktivity – γ). Měrný, tedy na jednotku objemu přepočítaný odpor, či vodivost, jsou účelné zejména z hlediska možnosti srovnání mezi jednotlivými materiály. Vzájemný vztah obou zmíněných veličin je následující:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

kde γ je konduktivita [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$],
 ρ je rezistivita [$\Omega\cdot\text{m}$].

Elektrická vodivost je způsobena pohybem volných částic. U nepolárních látek závisí elektrická vodivost převážně na přítomnosti různých nečistot a přítomnosti vody, kde tyto parametry jsou vlivem stárnutí. Při zvýšeném tepelném namáhání izolační kapaliny roste vodivost exponenciálně s teplotou.[20,21] Elektrická vodivost závisí jak na vlhkosti, množství nečistot, teplotě, tak i na přiloženém napětí.

Díky této závislosti můžeme posoudit olej z hlediska cizích částic, a zda obsahuje vodu. Jednotka vnitřní rezistivity je $\Omega\cdot\text{m}$, v praxi se však používá $\Omega\cdot\text{cm}$. Autoři [21] poskytli vztah pro určení vnitřní rezistivity.

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

kde ρ_v je vnitřní rezistivita [$\Omega\cdot\text{m}$],
 C_0 je kapacita prázdné nádoby [F],
 R_v je naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu [Ω],
 ε_0 je permitivita vakua $8,8 \cdot 10^{-12}$ [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$].

2.1.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ vyjadřuje dielektrické ztráty, které jsou úměrné příkonu, jenž se mění v teplo působením střídavého elektrického pole. Ohřevem dielektrika se rezistivita sníží, vzroste vodivost a polarizační složka dielektrických ztrát, a to se projeví zvýšením procházejícího proudu, který působí ohřátí izolace. Se vzrůstající teplotou se urychluje stárnutí a s tím i související fyzikálně chemické pochody.

Pokud bereme čisté izolanty, které neobsahují nečistoty a příměsi polárního charakteru, jsou zde dielektrické ztráty pouze vodivostí dielektrika. Pokud je malá vodivost, je malý i ztrátový činitel. Závislost ztrátového činitele na teplotě je rostoucí s kladnou druhou derivací.

Vezmeme-li v úvahu zestárlé izolační oleje obsahující nečistoty či polární a iontové složky, jsou dielektrické ztráty dány vodivostními a polarizačními ztrátami. Ztrátový činitel pak závisí na teplotě a frekvenci. S rostoucí teplotou opět ztrátový činitel roste, ale v určitém intervalu teplot dosahuje lokálního maxima, právě vlivem polarizačních ztrát. [3]

2.2 Fyzikální parametry izolačních kapalin

2.2.1 Viskozita

Jednou z velmi důležitých vlastností olejů je viskozita. Tato fyzikální veličina nám popisuje tekutost. Především se jedná o přitažlivé síly mezi částicemi. Pokud jsou tyto síly menší, je menší viskozita a je menší odpor proti proudění, to znamená, že je tekutější. Pokud jsou tyto přitažlivé síly větší, odpor proti proudění je větší a kapalina se stává méně tekutou.

Například při volbě oleje do transformátoru je výhodnější kapalina s nižší viskozitou, kde se snáze dostane do pórů izolace a lépe odvádí teplo, čili lépe chladí. [3], [21]

2.2.2 Barva

Tento parametr nám určuje jakost izolační kapaliny, a zdali jsou přítomné cizí částice a jiné nežádoucí látky. Barva je prvním kritériem, kterým můžeme orientačně určit stav kapalného izolantu již při odběru vzorku ze stroje. Barva je parametr, který se porovnává s předem danými standardy, kde výsledek se zapíše číslem, popř. číslem a písmenem. Pro dnešní kapalně izolanty platí, čím větší jakost, tím je barva světlejší. Kdežto oleje, které stárnou, tmavnou. [3]

2.2.3 Bod vzplanutí

Bod vzplanutí je důležitým parametrem, a to především z požárního hlediska. Je definován jako nejmenší teplota, při které zahřátý olej vyprodukuje dostatek páry k tomu, aby vytvořil hořlavou směs se vzduchem. Je to ukazatel nestálosti oleje. Měření se provádí tím způsobem, že se přiloží plamínek a ten se musí vznítit a zhasnout. [22], [3]

2.2.4 Bod tuhnutí

Bod tuhnutí je nejnižší teplota, při které olej poteče. Tento parametr je důležitý především v zemích, kde jsou chladné klimatické podmínky a mohlo by docházet tedy k problémům ztuhnutí kapaliny. Jelikož pak roste viskozita, to znamená, že kapalina nebude dobře cirkulovat a ztratí své izolační, a především chladicí účely. [22], [3]

2.3 Chemické parametry izolačních kapalin

2.3.1 Biologická odbouratelnost

Biologická odbouratelnost je důležitá především z hlediska životního prostředí. Spočívá v tom, že po určitou dobu, která je podle normy ASTM 21 dnů, se hodnotí schopnost mikrobu odstranit nebo rozložit daný materiál. V případě izolační kapaliny na složky uhlíku, kyslíku, a různé minerální soli. Je mnoho standardů, dle kterých se měření provádí, jako příklad můžeme uvést OECD 301 D, F, dále CEC L-33-A-94. [23]

2.3.2 Oxidační stabilita

Oxidace je reakce mezi kyslíkem ve vzduchu a molekulami izolační kapaliny, většinou mezi kyslíkem a uhlovodíky. Kyslík je při oxidaci zabudován do molekul oleje a tím mění jeho vlastnosti. Tento proces je podporován teplotou. S rostoucí teplotou olej rychleji oxiduje. Zvýšení teploty o 10°C přináší přibližně zdvojnásobení oxidace. [24], [3]

U izolačních kapalin sledujeme tento parametr z důvodu dlouhodobého provozního namáhání. Dále pro možnost porovnání oxidační stálosti různých izolačních kapalin. Pokud provádíme oxidační zkoušky se zaměřením na oxidační stabilitu, namáháme izolační kapalinu

zvýšenými dominantními činiteli vyvolávajícími stárnutí. Jedná se především o zvýšenou teplotu, přítomnost kyslíku nebo vzduchu a přítomnost kovů. [3]

Izolační kapalina se dále hodnotí z hlediska stability, což znamená, jak si kapalina uchovala nebo jak zhoršila své elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti.

2.3.3 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti je definováno jako množství hydroxidu draselného (KOH) potřebného k neutralizaci jednoho gramu oleje. Norma ČSN EN 62021–2 definuje povolené množství kyselých látek obsažených v izolačních olejích, především se to týká nových olejů. Zde mohou být považovány za látky s kyselým charakterem anorganické a organické kyseliny, estery, fenolické sloučeniny, laktony, pryskyřice, soli těžkých kovů, amonné soli a jiné slabé zásady. Kyselé látky jsou nežádoucím jevem v izolačních kapalinách, jelikož zvětšování množství těchto látek urychluje stárnutí kapaliny. Množství této látky se snažíme upravovat již při rafinaci. Můžeme také zjistit stupeň rafinace.

Částečně můžeme sledováním čísla kyselosti zjistit změnu parametrů izolační kapaliny a jeho stárnutí. Látky kyselého charakteru mohou pocházet z původní suroviny, ale mohou se do vzorku dostat například oxidačními reakcemi v průběhu stárnutí, jednak jako aditiva přidaná do izolačních kapalin, například inhibitory, jednak jako detergenty. Se vzrůstajícím stářím oleje se oxidační číslo zvětšuje. [25], [3]

2.3.4 Obsah vody v oleji

Obsažená voda v oleji především snižuje elektrickou pevnost, což je nežádoucí, a je to tedy velmi důležitá vlastnost izolační kapaliny. Jelikož vlhkost zde působí jako nosič náboje, který zvyšuje vodivost kapaliny. Do kapaliny se vlhkost dostává převážně z ovzduší nebo jako doprovodný prvek stárnutí oleje.

2.4 Degradční mechanismy

Izolační kapaliny podléhají degradaci, kterou lze definovat jako postupné zhoršování fyzikálních, chemických, tak i elektrických parametrů vlivem provozních, či okolních podmínek. Degradace izolační kapaliny výrazně ovlivňuje životnost izolačního systému jako celku. Například u transformátorů, kde je nejrozšířenější izolační systém olej – papír. Životnost elektrického zařízení je definována v [47] jako způsobilost zařízení plnit požadované funkce do mezního stavu stanoveného technickými podmínkami. Životnost je tedy provozní doba vyjádřena např. počtem provozních hodinových cyklů či počtem vykonaných funkcí.

Degradční děje můžeme rozdělit na vratné a nevratné. Vratné děje odezní ihned po odeznění vnějšího vlivu, nejčastěji bývají fyzikální. Dále jsou zde jevy nevratné, tyto změny nastávají vlivem chemicko-fyzikálního působení. Tyto změny trvale mění charakter látky a zhoršují vlastnosti. Může například dojít ke zhoršení chlazení, následkem usazování kalů, snížení elektrické a mechanické pevnosti, zhoršení oxidační stability. Z velké většiny případů působí degradaci elektroizolačních kapalin více vlivů najednou.

2.4.1 Oxidační stárnutí

Běžným nežádoucím vlivem, který působí na kapaliny je oxidace, která se zde může objevit vlivem netěsnosti nádoby nejčastěji mezi průchodkami a víkem, či vlivem reakcí vznikajících v kapalině. Oxidačním stárnutím nejprve vzniká množství kyslíkatých organických látek (alkoholy, estery, aldehydy, ketony, kyseliny atd.), jejichž molekuly jsou podstatně polárnější než molekuly původních uhlovodíků a jsou v oleji rozpustné. Jako vedlejší produkty vznikají oxid uhličitý a reakční voda. Produkty stárnutí zhoršují elektrické vlastnosti oleje, organické kyseliny rozpouštějí kovové materiály (zvětšují iontovou vodivost oleje). Oxidace zpravidla působí souběžně s tepelnou degradací, popřípadě s různými katalyzátory nebo vodou. Dále mají významný vliv chemické látky kyselé a alkalické povahy. Neopomenutelným faktorem zapříčiňujícím degradaci elektroizolačních kapalin je elektrické namáhání, které také výrazně zvyšuje degradaci elektroizolačních materiálů. Samozřejmě mezi tyto faktory patří mechanické namáhání a různé klimatické vlivy.

Vlivem těchto faktorů musíme provádět včasnou a pravidelnou diagnostiku dielektrických systému, abychom mohli zabránit případným poruchám, či destrukci systému,

což by mohlo mít za následek zničení celého zařízení, kdy bychom se pak pohybovali v milionových škodách.[34], [35], [36], [38]

2.4.2 Tepelné stárnutí

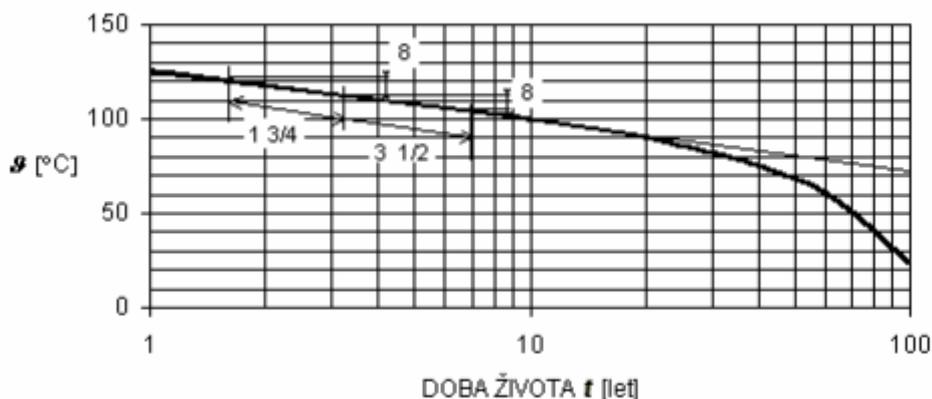
Degradace izolačních systémů je nejvíce urychlována převážně působením vyšších teplot. Vlivem tepelného namáhání dochází k rozkladu izolace olej-papír. Norma ČSN IEC 60076-7 používá teplotu pro určení zbytkové životnosti izolačního systému olej papír, norma je blíže popsána v kapitole 3.3. Doprovodným jevem stárnutí je například vznik různých plynů, které se rozpouští v oleji a nepříznivě ovlivňují vlastnosti izolační kapaliny, také dochází k oxidaci, polymeraci atd. K tomuto dochází i při běžných teplotách, ovšem se zvyšující se teplotou roste míra degradace. Životnost materiálu je exponenciální funkcí teploty, vyplývá z toho tedy, se zvýšením teploty exponenciálně snižuje životnost elektroizolační kapaliny.[34], [37]

Tepelné stárnutí lze určit i pomocí výpočetních vztahů, mezi prvními se o kvantitativní vyjádření tepelného stárnutí a o matematickou formulaci jeho časového průběhu úspěšně pokusil V. M. Montsinger, který systematicky vyšetřoval dobu života papírové izolace vodičů v olejových transformátorech na základě měření úbytku mechanické pevnosti papíru v závislosti na konstantní teplotě (ϑ), a to v rozmezí 90 °C – 110 °C. Přitom zjistil, že experimentální výsledky lze vyjádřit exponenciální funkcí, která udává závislost doby života izolace na teplotě a lze ji vyjádřit

$$t = A \cdot e^{-m\vartheta}, \quad (6)$$

kde t je doba života,
 m, A jsou materiálové konstanty (A má význam fiktivní doby života t_0 při teplotě $\vartheta = 0$ °C),
 ϑ je konstantní teplota stárnutí.

Montsinger dále odvodil, že doba života t klesne při zvýšení teploty o $\Delta\vartheta = 8$ °C na polovinu a naopak při snížení teploty o $\Delta\vartheta = 8$ °C se doba života zdvojnásobí na $2t$. Toto je tzv. Montsingerovo pravidlo osmi stupňů Celsia, které je zobrazeno na Obr. 3:.



Obr.3: Závislost doby života izolace na teplotě (Montsingerovo pravidlo osmi °C) Převzato z [43]

Montsingerovo pravidlo 8 °C nemá obecnou platnost, neboť platí jen pro papír v oleji a pro úzký rozsah teplot, v němž bylo vyšetřeno.

Na základě Montsingerova empirického vztahu navrhl Dakin mechanismus tepelného stárnutí, podle něhož zvyšuje účinek teploty rychlost chemických reakcí. Jedná se o vztah mezi rychlostí degradace R a teplotou, který vede na Arrheniovu rovnici

$$R = R' \exp\left[-\frac{\Delta W}{kT}\right], \quad (7)$$

kde ΔW je aktivační energie (hlavní) reakce zapojené do procesu,

k je Boltzmanova konstanta,

T je absolutní teplota,

R rychlost stárnutí.

Pro dobu konečného výsledku, což je tepelná životnost, platí

$$L = \frac{C}{R} = A \exp\left[\frac{B}{T}\right], \quad (8)$$

$$A = \frac{C}{R'}, \quad (9)$$

$$B = \frac{\Delta W}{k} \quad (10)$$

Rovnice (8) je představena jako Arrheniův vztah a bývá zobrazována v Arrheniově diagramu, což umožní extrapolaci od testované do užívané teploty. Při existenci účinků kompenzace, která zahrnuje změny v životnostních modelech, lze Arrheniovou rovnici napsat jako

$$L = A \exp \left[\frac{k_1 \log[A] + k_2}{T} \right] \quad (11)$$

kde k_1 a k_2 jsou parametry regrese popisující vztah $\log A$ versus B ,
 L je doba života izolantů.[43]

Zkoumání míry tepelného stárnutí lze mnoha způsoby, např. ve studii [39] autor poukazuje na tepelné stárnutí v závislosti na výše zmíněnou aktivační energii. Aktivační energie je definována jako energie, která musí být látce dodána, aby daná reakce mohla proběhnout. Obvykle se značí E_a nebo ΔW a její základní jednotkou je $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Aktivační energie výrazně ovlivňuje životnost elektroizolačních materiálů, čím větší aktivační energii materiál disponuje, tím více odolává chemickým reakcím, které způsobují degradační pochody v jeho vnitřní struktuře. Autor daný experiment prováděl na vzorcích minerálních olejů (Technol, ITO 100 a BTSi), které následně porovnával se syntetickými kapalinami (DBP, DOA a DIBA), které jsou založeny na bázi syntetických esterů a disponují tedy vysokou biologickou odbouratelností. Tepelné stárnutí zde probíhalo po dobu 3000 h při teplotě 90 °C. Výsledky měření ukázaly, že se syntetické oleje DOA a DBP vyznačují vyšší aktivační energií. Její hodnota má ale v rámci stárnutí tendenci ke snižování. Jejich nestabilita v prvních fázích tepelného stárnutí může mít příčinu v nižší oxidační stabilitě. Minerální oleje (kromě oleje ITO 100) se společně se syntetickým olejem DIBA projevují vyšší stabilitou aktivační energie, přestože je její absolutní hodnota obecně nižší než u olejů syntetických. Nejvyšší aktivační energii vykazuje v rámci všech stupňů stárnutí olej DOA. Tento olej má také nejvyšší teplotní odolnost ze všech testovaných olejů. Aktivační energie oleje DBP v rámci stárnutí prudce klesá a olej DIBA je z pohledu vývoje aktivační energie v rámci tepelného stárnutí velmi podobný olejům minerálním.

V další studii [45] se ti samí autoři zaměřili na porovnání minerálních olejů s oleji na přírodní bázi. Mezi použitými minerálními oleji byl Shlell Diala DX a Technol Y3000.

Rostlinné oleje byly zastoupeny slunečnicovým a řepkovým, ty byly dále podrobeny modifikaci pomocí hydroxidu draselného, kdy autoři provedli neutralizaci nežádoucích kyselých reagujících složek. Posledním zástupcem byl olej Envirotemp FR3 od firmy Cooper industries vyrobený z přírodních esterů a biologicky odbouratelných přísad. FR3 disponuje biologickou odbouratelností okolo 95 % a vyniká také vysokým bodem hoření (360 °C) a vzplanutí (330 °C).

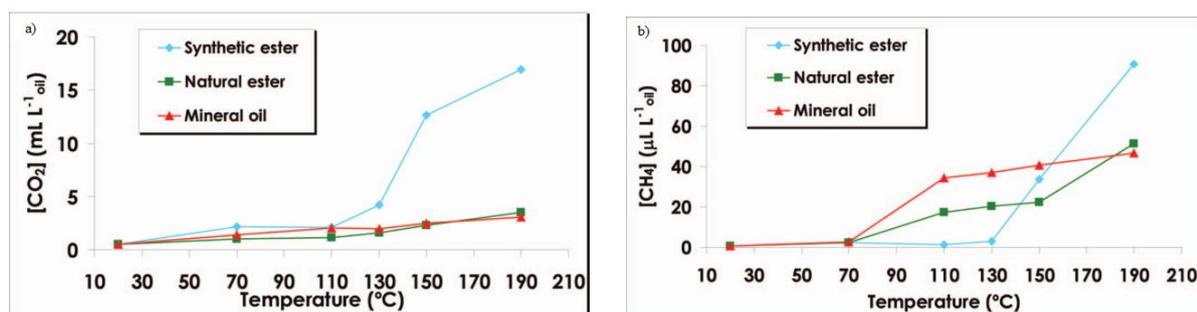
Autoři zde sledovali změnu příslušných parametrů (ztrátový činitel $\tan \delta$, polarizační index, izolační odpor) izolačního systému transformátoru olej-papír v závislosti na teplotě. Tepelné stárnutí probíhalo při teplotě 90 °C po konečnou dobu 4000 h.

Experiment dokázal významnost použití vhodné izolační kapaliny na celkové izolační vlastnosti systému stejně jako na jeho teplotní odolnost. Z hlediska porovnání běžných rostlinných olejů (řepkový, slunečnicový), olejů z přírodních esterů (FR3) a olejů minerálních (Technol Y 3000, Diala DX) byly vyvozeny následující závěry. Ukázalo se, že než se systém olej-papír dostane k odpovídajícím velikostem elektrických parametrů, potřebuje určitý čas. Nejlepších výsledků z hlediska viskozity, elektrických vlastností i čísla kyselosti dosahovaly oleje minerální. Jejich nevýhodou je o něco delší doba potřebná pro dosažení optimálních vlastností. Lze předpokládat, že je to především díky vlivu menší viskozity na vhodné prosycení transformátorové lepenky. V případě rostlinných olejů spolu s FR3 byla u ztrátového činitele dosažena jeho relativně stabilní hodnota za kratší časový interval. Velikost vzorku, konkrétně jeho tloušťka, rozhodovala o rychlosti, s jakou se daný vzorek nasytí a bude tak optimálně plnit svoji funkci. Čím větší je tloušťka vzorku, tím větší objem se musí nasytit, a časový interval se tak prodlužuje. Obecně u environmentálních olejů nastal tento jev přibližně o 100 h dříve než u olejů minerálních. [45]

„Minerální oleje disponovaly oproti environmentálním (řepkový, slunečnicový, FR3) mnohem lepšími vlastnostmi (ztrátový činitel, vnitřní rezistivita, číslo kyselosti, dielektrické ztráty, viskozita) a stabilitou těchto parametrů z hlediska teplotního namáhání. Nejvyšší hodnota elektrické pevnosti (74,7 kV/2,5 mm) byla určena u oleje FR3. Environmentální oleje působením teploty výrazně zhoršují svoje jednotlivé vlastnosti. Jako perspektivní olej pro použití v transformátorech se ukázal FR3, svými vlastnostmi se nejvíce blíží olejům minerálním, bohužel jeho cena je mnohem vyšší, oproti minerálním olejům.“ [45]

Jiný přístup zvolili ve studii [40], kde porovnávali minerální olej, se syntetickým esterem a esterem založeným na přírodní bázi. Zde podrobili tyto tři kapaliny stárnutí po dobu jednoho týdne při teplotě 70 °C, další týden byla teplota zvednuta na 110 °C, 130 °C, 150 °C a následně pak na teplotu 190 °C. Po celou dobu stárnutí získávali hodnoty CO, CO₂, obsahu

vody. Jak je patrné z Obr.4: a), který zobrazuje závislost obsahu CO_2 na zvyšující se teplotě, ester na přírodní bázi má srovnatelné vlastnosti s olejem na bázi minerální. Obr. 4: b) zde je vyobrazená závislost obsahu metanu na zvyšující se teplotě, je zde možno vidět, že v průběhu tepelného stárnutí až do teploty $190\text{ }^\circ\text{C}$ disponoval přírodní ester menším obsahem metanu, než olej minerální. [40]



Obr. 4: a) Znázorňuje závislost obsahu CO_2 na zvyšující se teplotě, b) Znázorňuje závislost obsahu metanu na zvyšující se teplotě. Převzato z [40].

V případě studie [41], [37] se autoři zabývali parametry, které se dle mého názoru nejčastěji vyskytují v případě diagnostiky izolačních kapalin, jsou jimi relativní permitivita, viskozita, rezistivita, elektrická pevnost a ztrátový činitel. V průběhu stárnutí izolační kapaliny se ukázal nárůst viskozity o 25 % za dobu 25 let. Ztrátový činitel zde také vzrostl z hodnoty 0,001 na hodnotu 0,025, stárnutí zde probíhalo také po dobu 25 let. Můžeme si dovolit brát tyto parametry jako ukazatel stárnutí, jenž může vyjádřit míru degradace. [41], [37]

2.4.3 Elektrické stárnutí

Elektrické stárnutí zahrnuje účinky působení elektrického pole, kdy se zvyšováním energie se zvyšují ztráty a lokální namáhání izolantu, při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole může koncentrace elektrického pole způsobit v tomto místě elektrický průraz a vodivá dráha se může šířit dál. Elektrické stárnutí má za následek vznik částečných výbojů, plazivých proudů, elektrických stromečků, elektrolýzy, účinky prostorových nábojů apod. [3], [38]

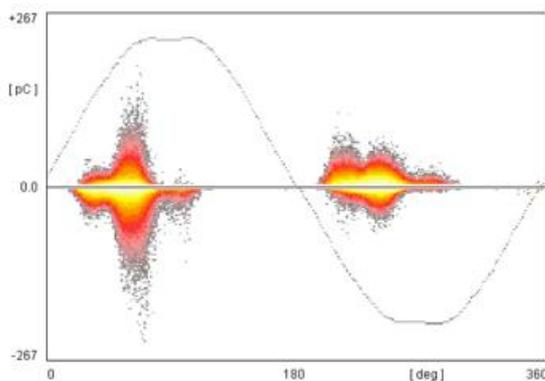
Částečné výboje vznikají v izolačních systémech vysokého a velmi vysokého napětí, kam patří například transformátory. Zde se vyskytují malé dutinky vyplněné plynem. Dutinky

vznikají již při výrobě i přes dodržení veškerých pracovních postupů. V dnešní době nám technologie neumožňuje odstranit veškeré nedokonalosti. Dutinky se mohou postupem času rozšiřovat vlivem velkého lokálního elektrického namáhání a mohou nabývat různých tvarů.

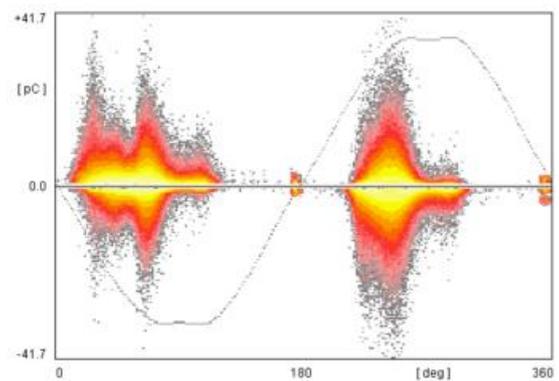
Při překročení určité napěťové hladiny se začnou projevovat částečné výboje. Výboje mohou mít dva různé charaktery, a to lavinový charakter, nebo se mohou podobat drobným jiskrovým výbojům. Nejnižší napětí, při kterém částečné výboje vznikají, se nazývá tzv. počáteční napětí částečných výbojů nebo spíše dnes častěji používaný termín – zapalovací napětí (U_i). Analogicky k tomu existuje termín zhašecí napětí (U_z), to jest napětí, při kterém částečné výboje uhasnou. Obě tato napětí se udávají v efektivních hodnotách. [3], [44]

Částečné výboje vznikají v nehomogenitách materiálu, kde je dutina vyplněná vzduchem nebo jiným plynem o permitivitě 1. Okolo je permitivita několikrát vyšší (3 až 10). Z toho plyne, že dutinky jsou třikrát až desetkrát více namáhány než zbytek korpusu (vyšší intenzita elektrického pole E [kV/mm]), a to má za následek vznik částečných výbojů, kde jejich působením začne vznikat ozon a oxid dusíku s příměsemi vody. Dále se zde objevují zředěné kyseliny dusičné, které působí chemicky agresivně na materiál izolace => degradace materiálu a kontinuální zvětšování nehomogenit. [3], [44]

Ve studii [15] zkoumali rozdíl elektrického namáhání a tepelného namáhání na izolační materiál. První vzorek vystavili po dobu 8 h teplotě 186°C. Druhý vzorek byl vystaven po dobu 8 h napětí o hodnotě 14 kV, sledovali fázové rozložení částečných výbojů, jak je vidět na Obr. 5:. Při experimentu bylo použito uspořádání hrot-deska.



Obr. 3: Fázové rozložení částečných výbojů měřeného uspořádání při 186°C a 8 hod



Obr. 4: Fázové rozložení částečných výbojů měřeného uspořádání při 14 kV a 8 hod

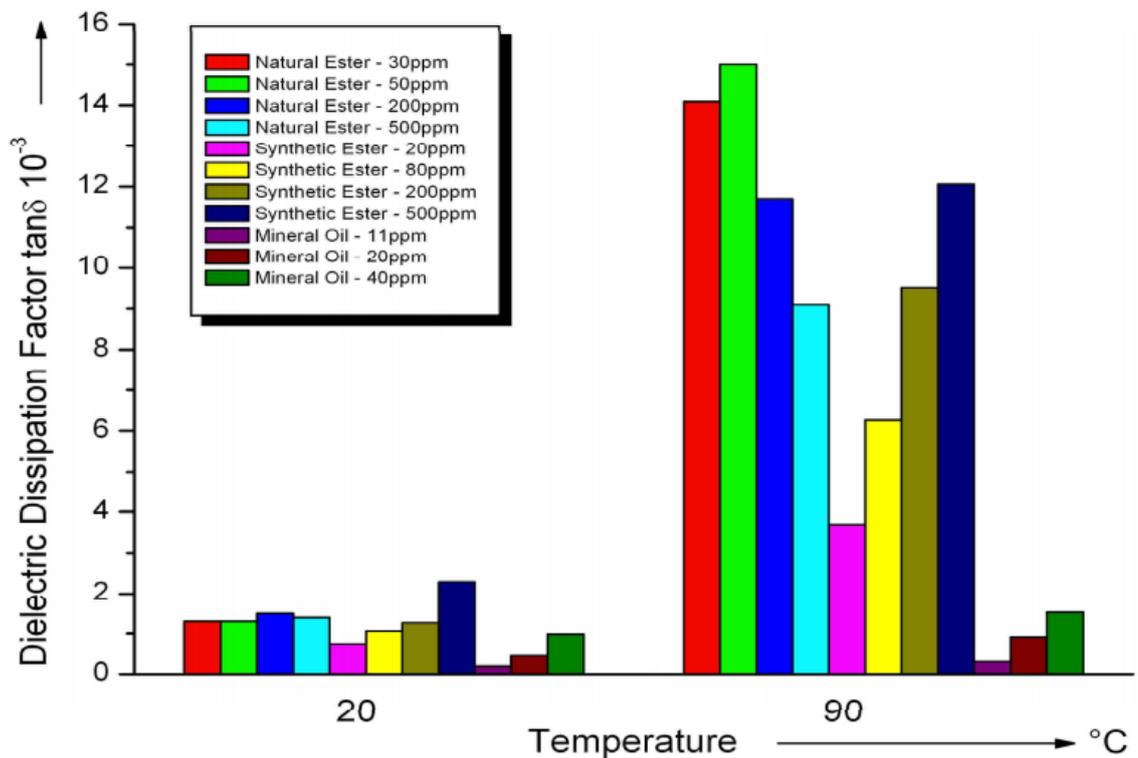
Obr. 5: Zobrazuje fázové rozložení částečných výbojů. Převzato z [15].

Z Obr.5: můžeme pozorovat větší četnost výbojové činnosti po elektrickém namáhání, dalo by se říci, že je dvojnásobná.

Cílem projektu [46] bylo porovnat elektrické a dielektrické vlastnosti elektroizolačních kapalin založených na bázi přírodních esterů, syntetických esterů s oleji minerálními. Pro měření částečných výbojů bylo použito uspořádání elektrod jehla-koule a jehla-deska. Zkoumaly se zde částečné výboje, permitivita a ztrátový činitel $\tan\delta$ v závislosti na teplotě, kdy rozsah teplot byl od 20 °C do 90 °C. Zabývali se zde také obsahem vody na výše zmíněné parametry, obsah vody se pohyboval v rozmezí 30 ppm až 500 ppm.

Výsledky experimentu ukázaly závislost teploty a obsahu vody na výše zmíněných parametrech. Průměrná hodnota zapalovacího napětí byla $25 \div 32,5$ kV, a to při všech teplotách. Množství obsahu vody mělo za následek vzrůstající charakter ztrátového činitele, bylo tomu tak u syntetických esterů a minerálních olejů. Oproti tomu u esteru, založeném na přírodní bázi, má ztrátový činitel klesající tendenci se zvyšujícím se obsahem vody, jak je vidět na Obr. 6.:

Opět se ukázala perspektivista kapaliny Envirotemp FR3, která disponovala podobnými vlastnostmi jako oleje minerální. [46]



Obr.6: Zobrazuje ztrátový činitel v závislosti na obsahu vody. Převezto z [46].

3 Experimentální část

3.1 Experiment

Předmětem experimentu bylo zjistit změnu vybraných parametrů v závislosti na tepelné expozici a následné porovnání vybraných vzorků s vysokou biologickou odbouratelností se vzorky běžně používaného minerálního oleje. K tomuto účelu byl vytvořen příslušný diagnostický systém pro měření vybraných parametrů. Bylo provedeno měření ztrátového činitele, absorpčních a resorpčních proudů, ze kterých jsme byly odvozeny další parametry a charakteristiky.

3.2 Příprava vzorků

Jak již bylo zmíněno v kapitole **1.2**, trendem posledních let je stále více využívat rostlinné oleje k výrobě elektroizolačních kapalin. Existuje velké množství studií, ve kterých se autoři zabývají použitím esterů na přírodní bázi a jejich elektroizolačními vlastnostmi, např. [6], [11], [27]. Autoři zde poukazují na využití palmového, kokosového, řepkového, slunečnicového oleje a dalších, vzhledem k našim klimatickým podmínkám a možností využití byl vybrán olej řepkový a slunečnicový, které byly na základě studií [10], [27] podrobeny modifikacím, konkrétně neutralizaci a reesterifikaci. Jednotlivé postupy jsou uvedeny níže.

Pro možnost porovnání byl použit minerální olej Shell Diala dx a syntetický olej MIDEL 7131, který disponuje vysokou biologickou odbouratelností. Vlastnosti syntetické kapaliny MIDEL 7131 jsou blíže popsány v kapitole **1.4.1**.

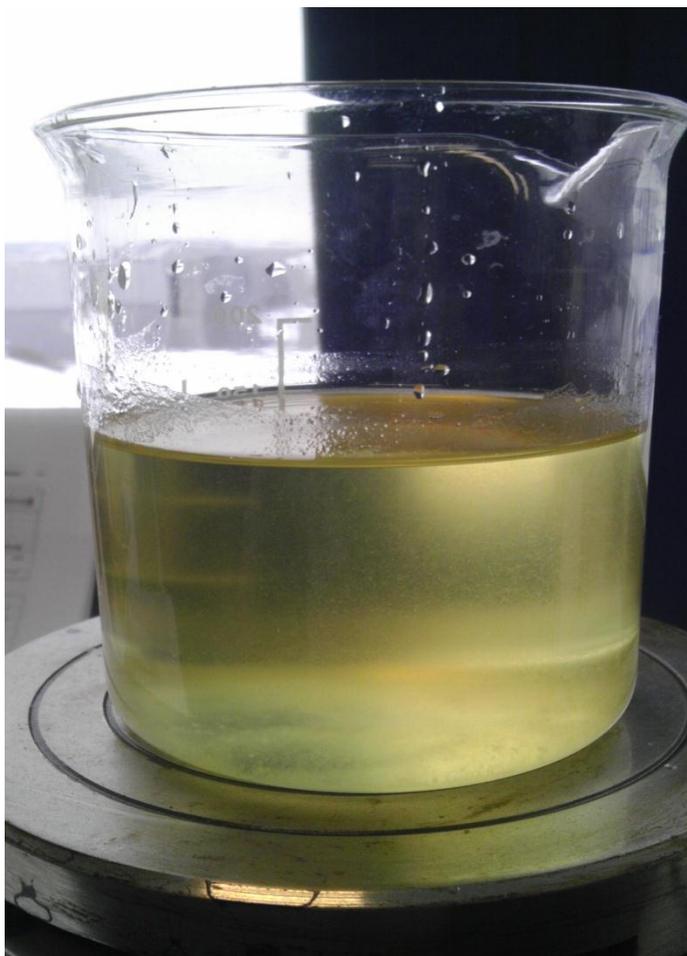
3.2.1 Neutralizace

Neutralizace je proces, při kterém se odbourávají nežádoucí kyselé látky na základě neutralizační rovnice **(1)**. Neutralizace přímo souvisí s číslem kyselosti, které je blíže popsáno v kapitole **2.3.3**.

Samotná neutralizace byla provedena pomocí hydroxidu sodného – NaOH. Nejprve bylo nutné hydroxid rozdrtit na prášek, který byl následně navážen a přidán do oleje v požadovaném množství množství 0,6 mg NaOH/g dle [27]. Hydroxid sodný byl za pomoci

magnetické míchačky s ohřevem rozpuštěn v oleji. Jak je vidět na Obr. 7:, vytvořil se kalný roztok, který byl následně pomocí filtračního papíru (o velikosti děr 8 μm) přefiltrován a zbaven pevných částic.

V průběhu měření se ukázalo, že hydroxid sodný má vliv na hodnotu ztrátového činitele, z tohoto důvodu byly vytvořeny vzorky o menší koncentraci hydroxidu sodného - 0,18 mgNaOH/g a další vzorek s vyšší koncentrací o hodnotě 1,1 mgNaOH/g. Tímto množstvím hydroxidu sodného byl modifikován pouze řepkový olej, jelikož disponoval nižší hodnotou ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ po první modifikaci.



Obr.7: Zakalený slunečnicový olej

3.2.2 Reesterifikace řepkového oleje

Reesterifikace je reakce, při níž reaguje alkohol s triglyceridem (olejem) v přítomnosti katalyzátoru, za vzniku esteru a glycerolu. V našem případě byl použit molární poměr

alkoholu a triglyceridu 2:1 za vzniku esterů, kyselin a glycerolu. Jako katalyzátor byl použit hydroxid sodný. Formu alkoholu jsme zvolili 96 % etanol, Isopropyl alkohol a lehký topný olej s přítomností bioethanolu.

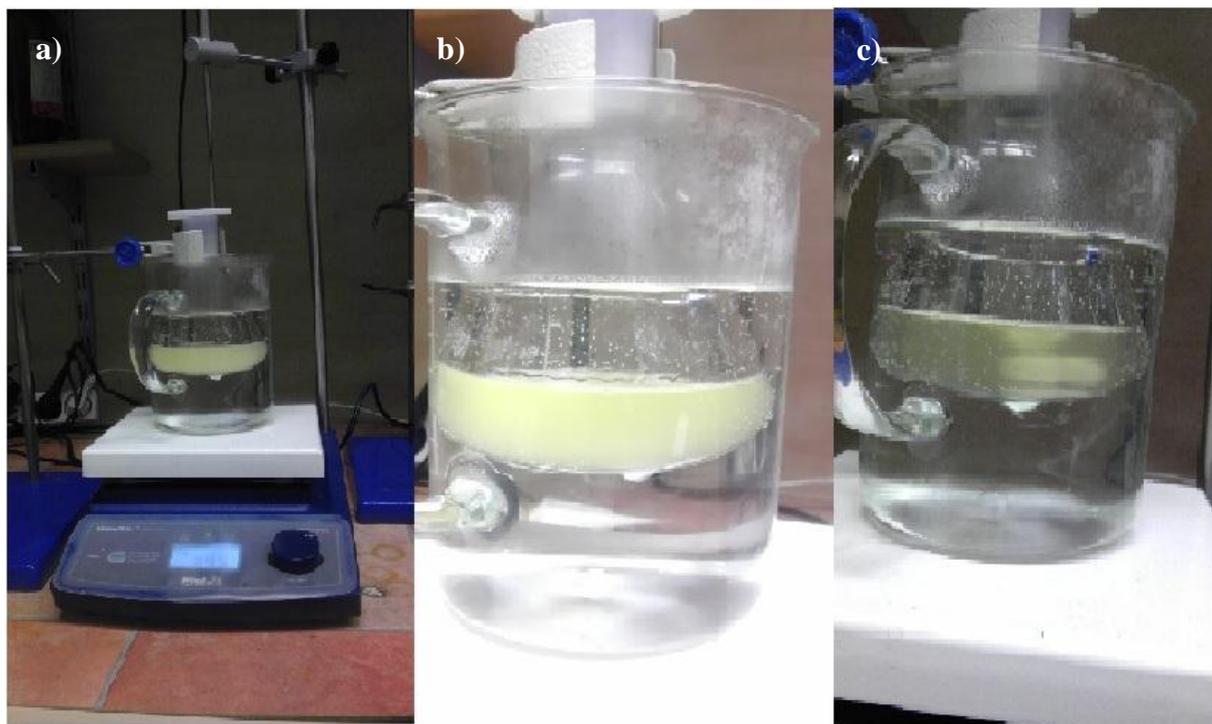
Chemikálie: hydroxid sodný, etanol, řepkový olej

Pomůcky: Kádinka, odměrný válec, zkumavka, magnetická míchačka s regulovatelným vyhříváním, držáky zkumavek, pipeta, váha.

Postup:

Příprava ethanálu sodného: 0,3 g hydroxidu sodného smícháme do 100 ml etanolu

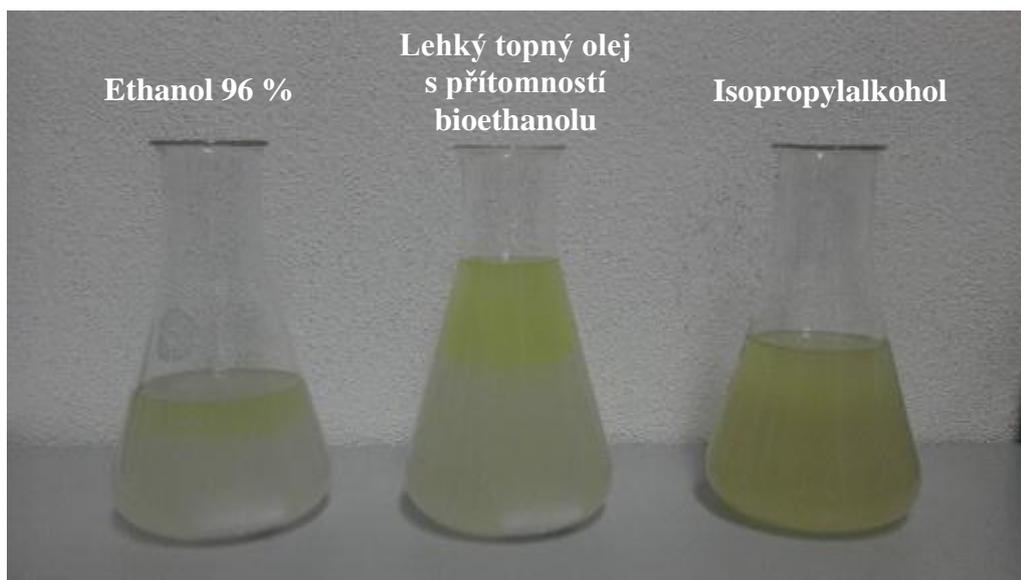
Reesterifikace: Kádinku jsme z poloviny naplnili vodou a zahřáli na 75 °C. Do suché zkumavky jsme nalili ethanólát a řepkový olej v poměru 2:1. Vhodili míchací tělísko. Dále jsme směs zahřívali na vodní lázni při intenzivním míchání. Nejprve se vytvořila mléčná emulze, jak je vidět na Obr.8: b), která postupem času přecházela v čirou kapalinu, což je zobrazeno na Obr.8: c). Poté jsme vypnuli ohřev a přilili jsme demineralizovanou vodu a krátce promíchali.



Obr.8: Reakce ethanólátu sodného s řepkovým olejem.

Smísí-li se reakční směs s vodou, reaguje ethanólát sodný částečně na hydroxid sodný a částečně na ethanol. Jak ethanol, tak glycerol, hydroxid sodný a ethanólát sodný jsou rozpustné ve vodě. Za několik minut se vytvořili dvě fáze, horní (nevodová) fáze, což je námi

požadovaný neesterifikovaný olej, taktéž bionafta a dolní fáze, která je námi nepotřebná. Horní požadovaná fáze byla pomocí pipety oddělena. Odpipetovaná část byla následně vložena do pece při teplotě 110 °C po dobu 5 h pro odstranění případné vlhkosti. Na Obr.9 jsou porovnány vzorky, ve kterých byl použit 96 % etanol, isopropylalkohol a lehký topný olej obsahující bioethanol. [28]



Obr.9: Zobrazuje vytvoření dvou fází při reesterifikaci pro jednotilvé druhy alkoholů.

Jak je vidět na Obr. 9: při použití etanolu 96 % a lehkého topného oleje, reakce proběhla dle očekávání. Oproti vzorku, ve kterém byl k výrobě ethanolátu použit isopropylalkohol, je patrné, že reakce neproběhla. Což bylo způsobeno menší kvalitou použitého alkoholu.

Hydroxid sodný absorbuje vlhkost okolí, to by mohlo mít za následek nežádoucí zvýšení obsahu vody v oleji. Proto byl nadrcený hydroxid ponechán po dobu 30 minut v peci při teplotě 110 °C.

3.3 Diagnostický systém

Jak již bylo zmíněno, cílem experimentu bylo zjistit změnu parametrů vlivem tepelné expozice. Velké množství studií, které se zabývají tepelnou degradací, uvádí parametry, které můžeme zohledňovat jako ukazatel stárnutí.[37], [41] Na základě těchto studií byly zvoleny parametry: ztrátový činitel, absorpční a resorpční proudy. Zmíněné parametry mají velkou výpovědi schopnost ohledně tepelné degradace. Ve velké většině případů se zde ztrátový

činitel měřil pouze při teplotě 90 °C, z tohoto důvodu jsem se rozhodl měřit ztrátový činitel v závislosti na teplotě od 20 °C do 100 °C s krokem 10 °C.

Tepelná degradace, byla zvolena na 110 °C podle normy ČSN IEC 60076: Směrnice pro zatěžování výkonových transformátorů. Norma poskytuje matematické modely pro posouzení následků různých zatížení s různými teplotami chladicího média a s přechodnými nebo periodickými časovými změnami. Uvedené modely umožňují výpočet provozních teplot v transformátoru, zvláště teploty v nejteplejším místě vinutí tzn. Hot-spot teplotu. Ta je postupně použita pro vyhodnocení relativní hodnoty pro rychlost tepelného stárnutí a procento zestárnutí v určitém časovém období. [42]

Na základě výše zmíněné normy byly vzorky vystaveny tepelnému stárnutí při teplotě 110 °C, která odpovídá relativní rychlosti stárnutí 1. Délka tepelné expozice byla 1000 h, kdy byly vzorky uvedené v Tab. 7: vyjmuty a proměřeny v časech: 0 h, 250 h, 500 h a 1000h.

Zkušební vzorky

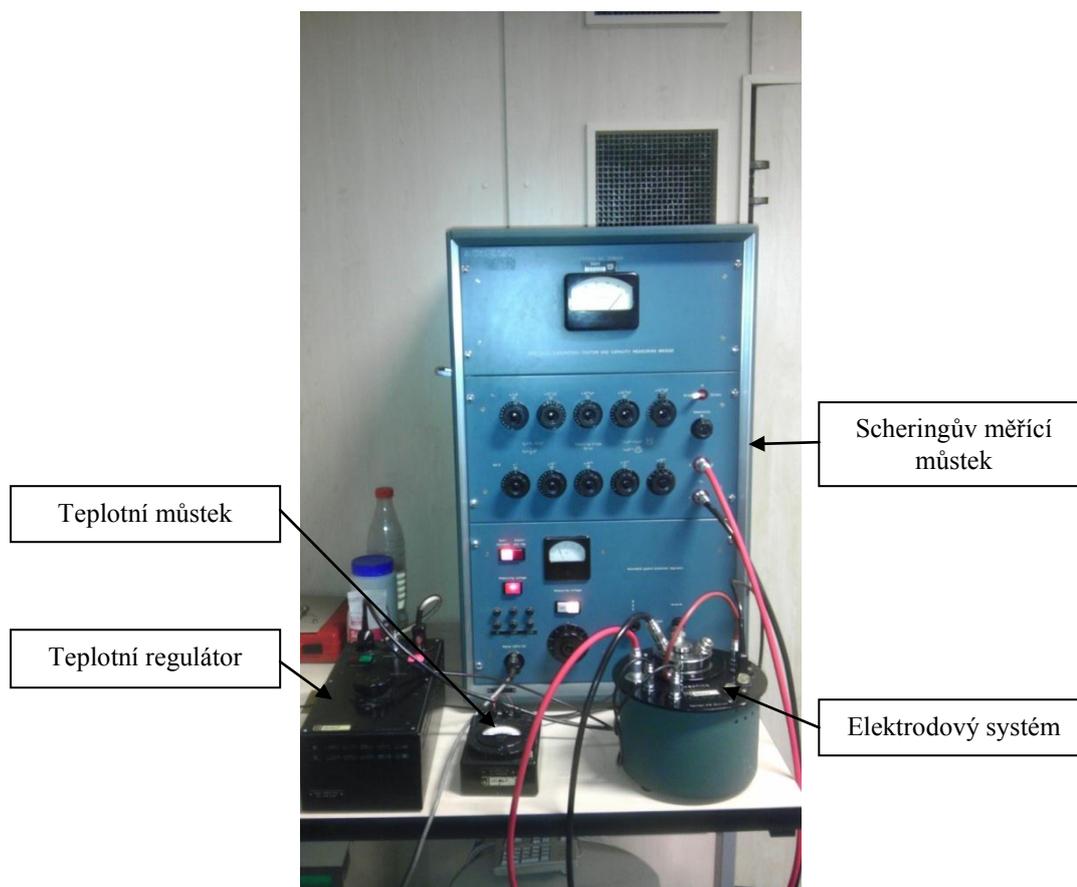
Rostlinné oleje	Minerální oleje	Syntetické oleje
Řepkový olej čistý	Shell diala dx	Midel 7131
Řepkový olej 0,18 mgNaOH/g	Shell diala dx - zestárnutý	
Řepkový olej 1,1 mgNaOH/g		
Řepkový olej 0,6 mgNaOH/g		
Reesterifikovaný řepkový olej		
Slunečnicový olej čistý		
Slunečnicový olej 0,6 mgNaOH/g		

Tab. 7: Zobrazuje použité oleje

Pro experiment byl zvolen olej řepkový a slunečnicový. Ty byly podrobeny modifikaci pomocí hydroxidu sodného (NaOH) a etanolu. Pro možnost porovnání byl použit minerální olej Shell Diala dx a syntetický olej MIDEL 7131, který disponuje vysokou biologickou odbouratelností. Bližší informace jsou v přílohách ve formě datasheetu.

3.3.1 Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$

V diagnostice elektrických zařízení je nepoužívanějším principem pro měření $\text{tg } \delta$ zapojení Scheringova můstku.[3] Pro měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$, byl použit měřicí můstek Rhode Schwarz, umístěný v laboratořích dielektrik FEL/KET. Dále byly použity přístroje od firmy Tettex, a to elektrodový systém, teplotní regulátor v rozsahu $20\text{ }^{\circ}\text{C} \div 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotní můstek.



Obr.10: Měřicí stanoviště ztrátového činitele.

Metoda Scheringova můstku

Můstek se skládá ze dvou hlavních částí. První část tvoří prvky uzavřené v prostoru zkušebny, druhá část slouží k vyvážení můstku. Galvanické oddělení tvoří vzorek v příslušném elektrodovém systému a kapacitní normál. Kapacitní normál je tvořen vysokonapěťovým kondenzátorem se zanedbatelnými ztrátami. Napěťový zdroj musí dodávat

napětí sinusového průběhu a mít dostatečný výkon, v našem případě bylo použito napětí 500 V. Ze schématu, které je zobrazeno na Obr.11:, je patrné, jak jsou v uzlových bodech diagonály můstku svodiče přepětí D , ty slouží k ochraně obsluhy při případném průrazu vzorků. Nízkonapěťová část se používá k vyvážení můstku pomocí odporové a kapacitní dekády R_3 a C_4 . Pomocí dekády R_3 se vyrovnává kapacitní složka náhradního sériového obvodu, dekáda C_4 slouží k vyvážení odporové složky. Vyvážení můstku je zde indikováno pomocí nulového indikátoru I . Stínění v nízkonapěťové části je proti vlivu elektromagnetických parazitních polí, ty by ovlivnily přesnost měření.

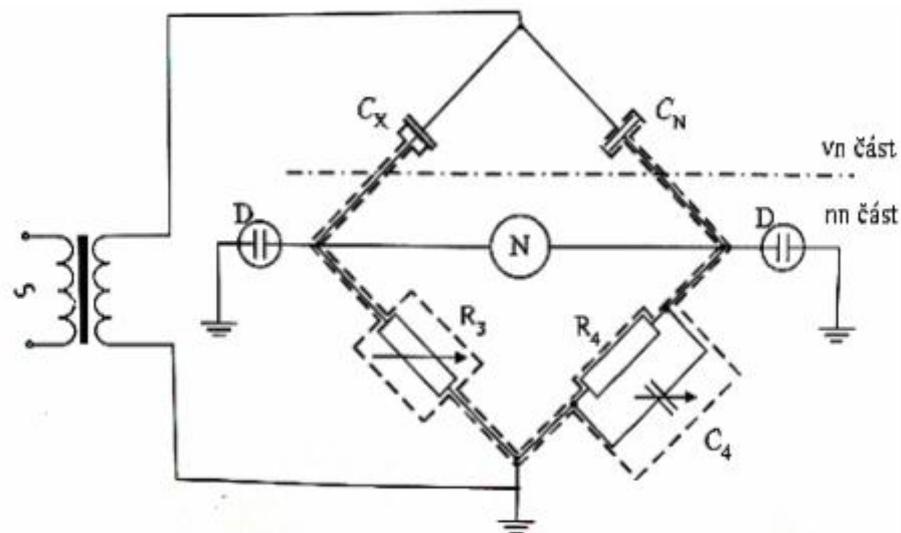
Pro usnadnění výpočtu ztrátového činitele při neměnné frekvenci 50 Hz je voleno $R_4=1000/\pi$, výpočet ztrát se dělá při uvažování sériového náhradního schématu.[3]

Pro vyrovnaný můstek platí:

$$C_S = C_X = C_n \frac{R_4}{R_3} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_S R_S = \omega R_S C_4 \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1 \cdot C_4, \text{ pro } R_4 = 1000/\pi \quad (13)$$



Obr.11: Scheringův vysokonapěťový můstek. Převzato z [33].

Elektrodový systém Tettex

Elektrodový systém Tettex, který je na Obr.12., se skládá z měřicího systému s válcovým kondenzátorem s ochrannými válečky pro kapalné materiály. Obsahuje také regulátor teploty a měřič teploty.

Z elektrodového systému bylo nutné před každým měřením odstranit mastnoty z předešlého měření. Elektrodový systém se musel rozebrat a za použití gumových rukavic a papírových ubrousků, vytřít do sucha. Otřený elektrodový systém byl odmaštěn pomocí použitého hexanu a štětce, tento proces se opakoval dvakrát. Obdobný proces, byl proveden na závěr s čistým hexanem. Takto odmaštěný elektrodový systém byl následně vložen do ultrazvukového čistícího systému, který byl naplněn demineralizovanou vodou o teplotě, zde byl ponechán při teplotě 60 °C po dobu 20 minut. Dále se elektrodový systém vyjmul z ultrazvukové čistící stanice a byl opět vysušen pomocí papírových ubrousků. Nyní následovala poslední fáze odmaštění pomocí čistého hexanu. Takto připravený systém se vložil do vyhřáté pece při teplotě 110 °C po dobu 45 minut, zde byl zbaven vlhkosti. Po vychladnutí byl systém připraven k sestavení a následnému použití.



Obr. 12: Měřicí systém s válcovým kondenzátorem. Převzato [29].

3.3.2 Postup měření

Měřicí stanoviště bylo sestaveno z výše uvedených přístrojů. V Tab.8: jsou uvedeny jednotlivé testované oleje, přehledně rozdělené do skupin podle typu. V určených intervalech byl změřen ztrátový činitel v závislosti na teplotě. Systém byl zahříván od 20 °C do 100 °C s krokem 10 °C. Měřicí napětí bylo stanoveno na 500 V při neměnné frekvenci 50 Hz. Při každé hodnotě byl můstek vyvážen a odečteny hodnoty $\text{tg } \delta$ a kapacita C_4 , kde z této kapacity byla vypočtena kapacita C_x , podle vzorce (9), a permitivita ε , která se získala z vypočtené kapacity. Měření probíhalo na základě ČSN EN 60247.

$$C_x = \frac{100}{C_4} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{C_x}{60} \quad (15)$$

kde C_x je vypočtená kapacita [pF]

ε je relativní permitivita [-]

C_4 je hodnota vyvažovací capacity [μ F]

Příklad výpočtu:

$$C_x = \frac{100}{0,53} = 188,413 \text{ pF} \quad (16)$$

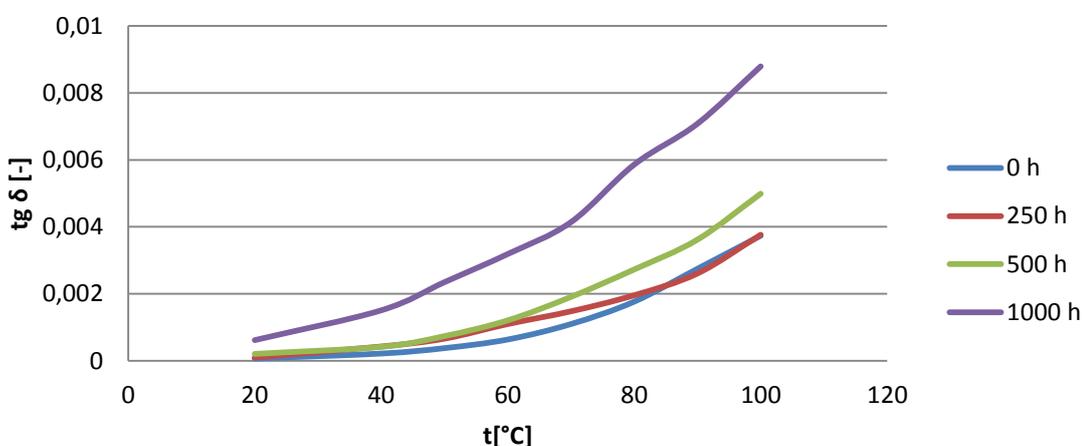
$$\varepsilon = \frac{188,413}{60} = 3,14 \quad (17)$$

3.3.3 Výsledky a vyhodnocení

Na níže uvedených Obr. 13, 14, 15: je zobrazen ztrátový činitel v závislosti na teplotě. Jednotlivé vzorky olejů podléhaly tepelné expozici, která trvala 1000 h.

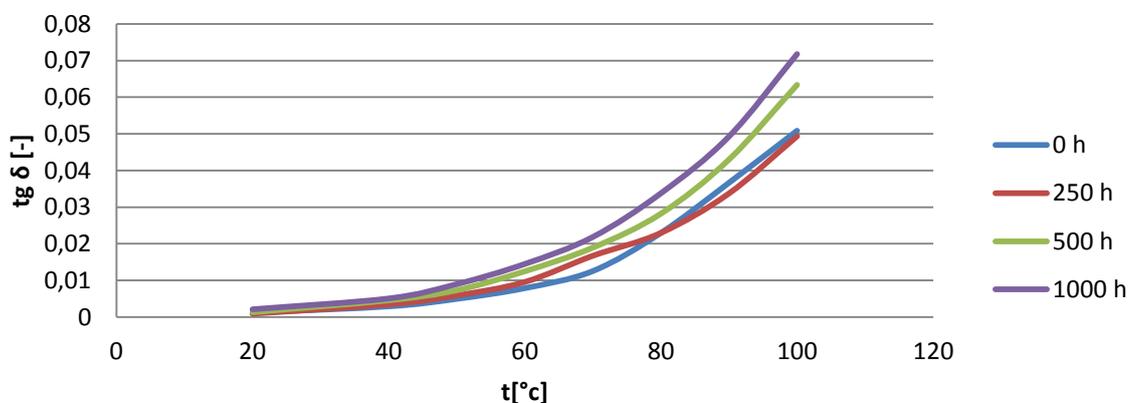
Obr. 16, 17: Znáznorňuje ztrátový činitel jednotlivých vzorků při teplotě 90 °C. Obr. 16: vyobrazuje pouze počáteční stavy vzorků. Oproti tomu Obr. 17: zobrazuje vzorky po celou dobu tepelné expozice. Měření probíhalo při napětí 500 V.

Závislost $\text{tg } \delta$ na teplotě Shell diala dx



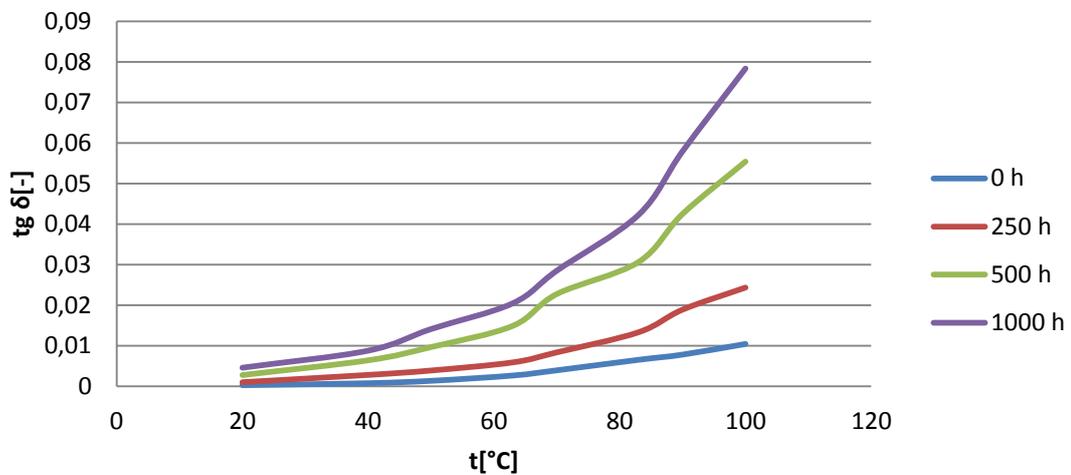
Obr. 13: Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ v závislosti na teplotě- Shell diala dx.

Závislost $\text{tg } \delta$ na teplotě MIDEL 7131



Obr. 14: Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ v závislosti na teplotě-MIDEL 7131.

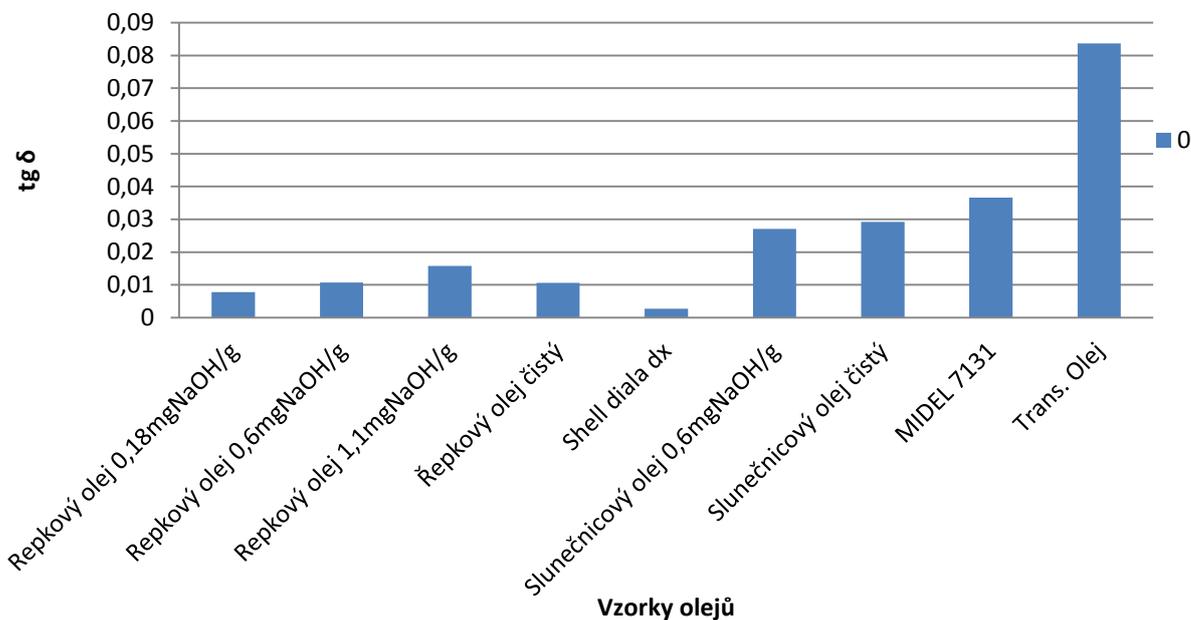
Závislost $\text{tg } \delta$ na teplotě Řepkový olej 0,18mgNaOH/g



Obr. 15: Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ v závislosti na teplotě-Řepkový olej 0,18 mgNaOH/g.

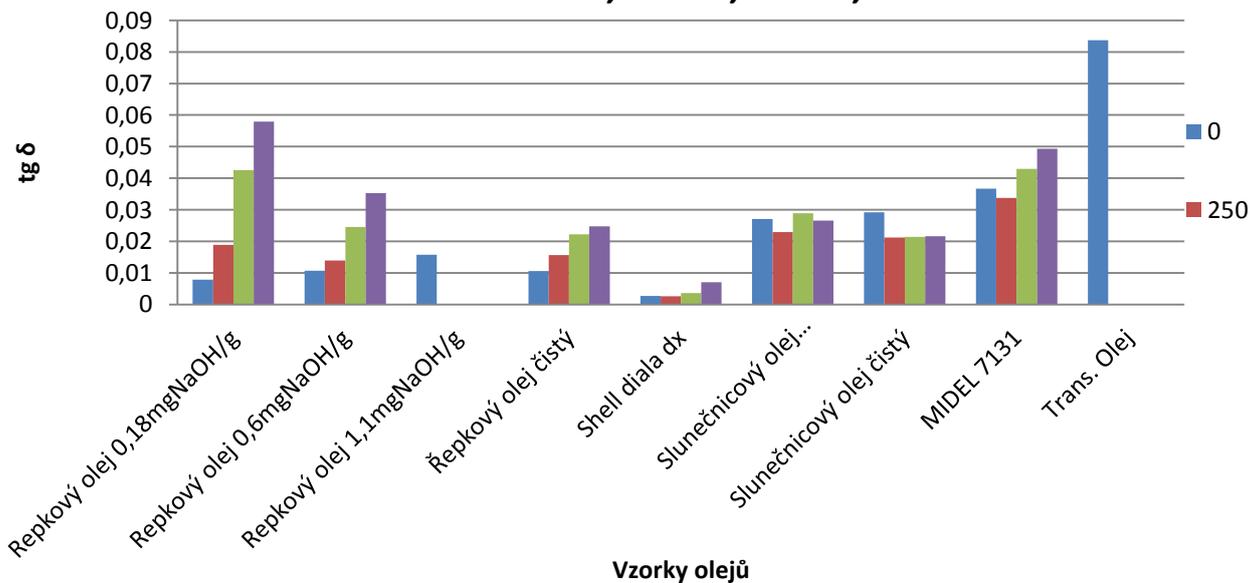
Z výše uvedených obrázků je patrné, že při vzrůstající teplotě roste ztrátový činitel, je tedy přímo závislý na teplotě. V průběhu tepelné expozice se vliv teploty zvyšuje, ztrátový činitel tedy roste rychleji.

Ztrátový činitel tg δ při 90 °C doba stárnutí 0 h



Obr. 16: Ztrátový činitel tg δ při teplotě 90 °C, doba stárnutí 0 h.

Ztrátový činitel tg δ při 90 °C doba stárnutí 0 h, 250 h, 500 h, 1000 h



Obr. 17: Ztrátový činitel tg δ při teplotě 90 °C, doba stárnutí 0 h, 250 h, 500 h, 1000 h.

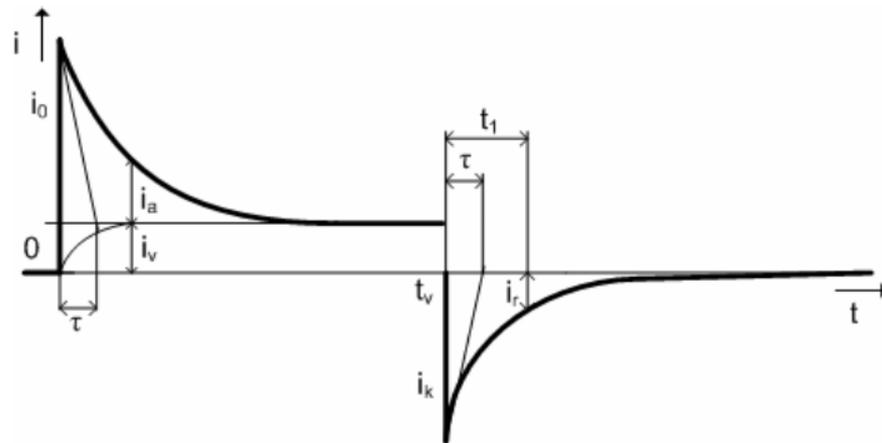
Jak je vidět z Obr.16:, dle předpokladů vychází z pohledu ztrátového činitele minerální olej Shell Diala dx, který disponoval hodnotou 0,002. U rostlinných olejů je patrné, že množství přidaného hydroxidu má vliv na hodnotu ztrátového činitele. Jako nejlepší varianta se v počátečním stavu zdála hodnota hydroxidu 0,18 mgNaOH/g, protože tento vzorek disponoval nejmenším ztrátovým činitelem z řad rostlinných olejů. Oproti tomu množství 1,1 mgNaOH/g přidaného do řepkového oleje, zvýšilo téměř o 50 % hodnotu ztrátového činitele oproti řepkovému oleji bez modifikace, z tohoto důvodu jsme se touto variantou modifikace dále v experimentu nezabývali. Použití ethanolátu sodného při reesterifikaci mělo za následek zbytkový alkohol v oleji, při prvním měření byla hodnota ztrátového činitele v řádech jednotek. Následným převařením oleje při 110 °C po dobu 8 minut byla změřena hodnota 0,083, což je výrazné zlepšení oproti původnímu stavu, nicméně je tato hodnota nevyhovující, proto s tímto vzorkem nebylo dále pokračováno v experimentu.

V průběhu stárnutí, jak je vidět na Obr.17: měl ztrátový činitel u většiny vzorků zvyšující se charakter, což bylo způsobeno tepelnou degradací. Pokles ztrátového činitele v průběhu stárnutí mohlo mít za následek vysušení zbytkové vlhkosti. Tento jev nastal u slunečnicových olejů a MIDEL 7131.

3.4 Měření absorpčních a resorpčních charakteristik

Dielektrickou absorpci můžeme označit jako soubor složitých nestacionárních procesů, které můžeme sledovat v reálném dielektriku kondenzátoru, pokud ho připojíme na zdroj stejnosměrného napětí. Dielektrikum v kondenzátoru nezareaguje ihned na skokovou změnu napětí, dochází zde ke zpomalení odezvy na působení elektrického pole, kterou označujeme jako dielektrickou absorpci. Časový průběh proudu při nabíjení a vybíjení kondenzátoru je na Obr. 18:. V průběhu vystupuje několik složek proudu. Nabíjecí proud i_0 , který odpovídá nabíjení geometrické kapacity a deformačním polarizacím. Velikost proudu je dána omezujícím odporem zdroje, přívodů a velikostí přiloženého napětí. Dobíjecí proud i_d protéká obvodem po doznění nabíjecího proudu, má složku absorpční a vodivostní. Absorpční proud i_a je dán součtem polarizačních proudů odpovídajícím jednotlivým relaxačním polarizacím v dielektriku. Vodivostní proud i_v k jehož ustálené hodnotě se asymptoticky blíží hodnota dobíjecího proudu. Tento druh proudu se uplatňuje především u zvlhlé izolace, kdy k jeho

velikosti významně přispívá iontová vodivost. V době t_v dojde k odpojení zdroje napětí a vyzkratování elektrod. Dochází zde k vybíjení kondenzátoru, kterému odpovídá časově proměnný proud skládající se ze dvou složek. A to složkou vybíjecího proudu i_k , který po vypnutí velice rychle odeznívá, a proudem resorpčním i_r . Ten je rovněž časově proměnný a asymptoticky se blíží k nulové hodnotě. Z důvodu vyrovnání náboje svodovými cestami uvnitř izolace neplatí rovnost mezi proudem resorpčním a absorpčním. [38], [48]



Obr. 18: Znáznorňuje časový průběh proudu při nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Převzato z [38].

Absorpční a resorpční charakteristiky poskytují cenné údaje o parametrech izolačních systémů. Pomocí těchto charakteristik můžeme například určit izolační odpor, polarizační index a mimo jiné i redukované resorpční křivky.

Pro měření absorpčních a resorpčních proudů byla zvolena voltampérová metoda, jejíž schéma je na Obr.16:. Měřící pracoviště bylo sestaveno z elektrodového systému od firmy Tettex, elektrometru Keithley 6517 A a PC, které disponovalo rozhraním VEE. Přístroje byly propojeny pomocí sběrnice s PC, kde probíhalo ukládání naměřených dat do textového souboru.

Použité zkušební vzorky jsou zobrazeny v Tab. 7:.

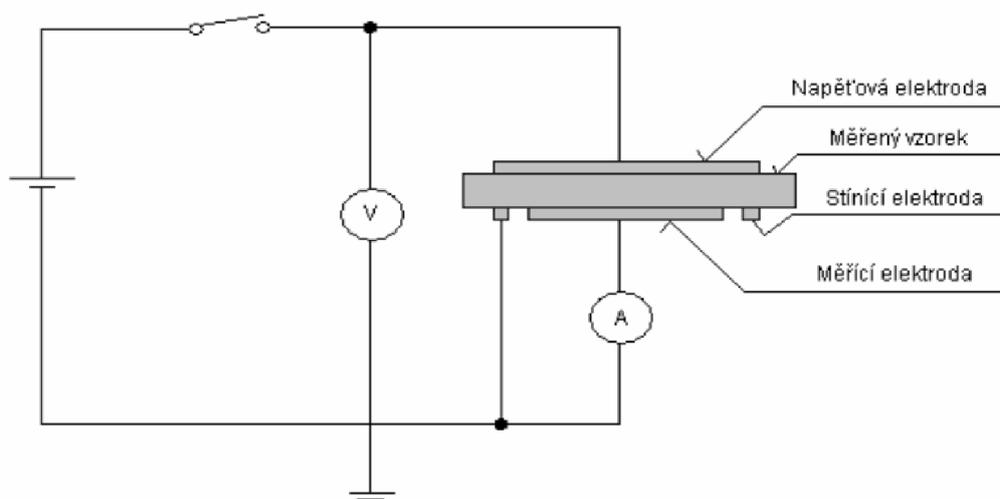
3.4.1 Postup měření

Měřící stanoviště bylo sestaveno z výše uvedených přístrojů. Všechny oleje byly vystaveny tepelnému stárnutí při teplotě 110 °C po dobu 1000 h, kde po určených intervalech

byly změřeny vybíjecí a nabíjecí proudy při napětí 500V za neměnné teploty 20 °C. Nejdříve došlo k vybíjení po dobu 300 s, poté byla měřena absorpce po dobu 600 s a následná resorpce s trváním také 600 s. Krok by zvolen 1 s. Program plně komunikoval s měřicími přístroji a zapisoval automaticky data do poznámkového bloku, odkud se následně exportovala do MS Excel. Měření probíhalo na základě ČSN EN 60247.

3.4.2 Schéma zapojení

Na Obr. 19: je zobrazeno schéma zapojení pro měření absorpčních a resorpčních proudů. Obvod se skládá ze zdroje, voltmetru, ampérmetru a elektrodového systému, který se skládá ze tří elektrod, jak je zobrazeno. Uvnitř elektrodového systému se nachází námi měřený olej.

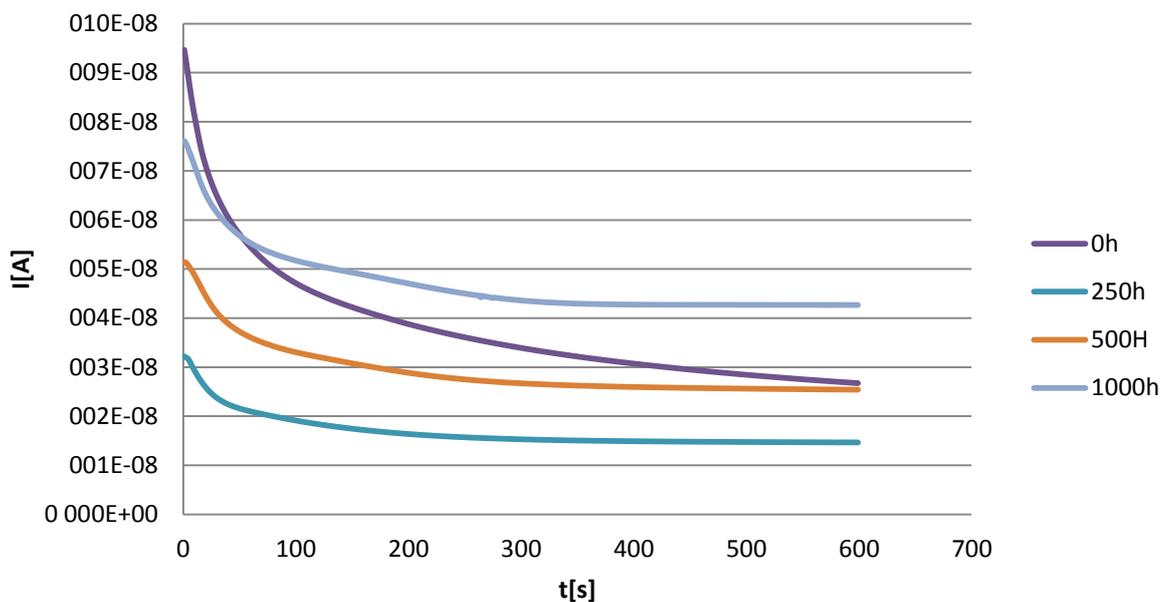


Obr.19: Znáznorňuje schéma zapojení na měření absorpčních a resorpčních proudů. Převzato z [29].

3.4.3 Výsledky měření absorpčních a resorpčních charakteristik

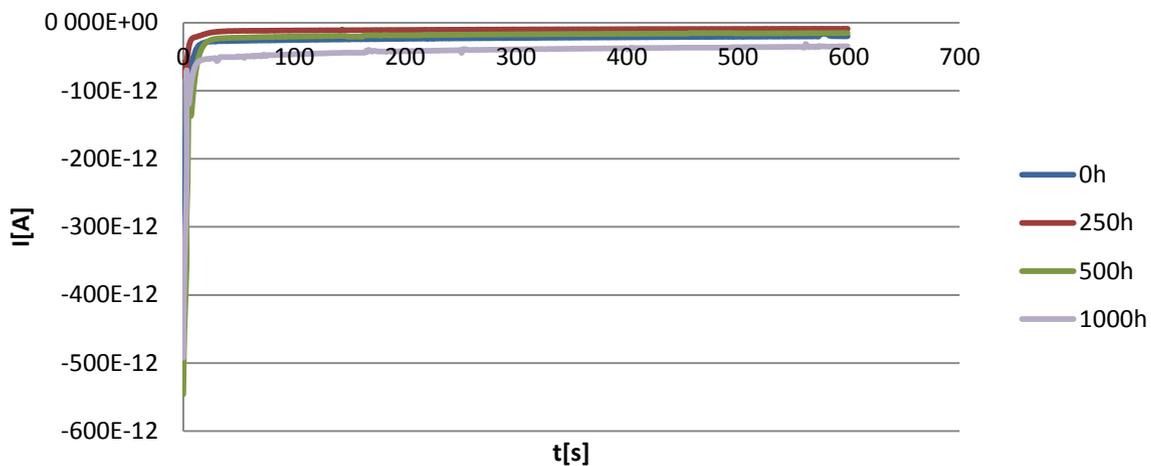
Na níže uvedených obrázcích je znázorněna závislost absorpčního a resorpčního proudu na čase. Je zde zobrazena také závislost měřených vzorků na teplené expozici, ta trvala 1000 h.

Závislost absorpčního proudu na čase MIDEL 7131

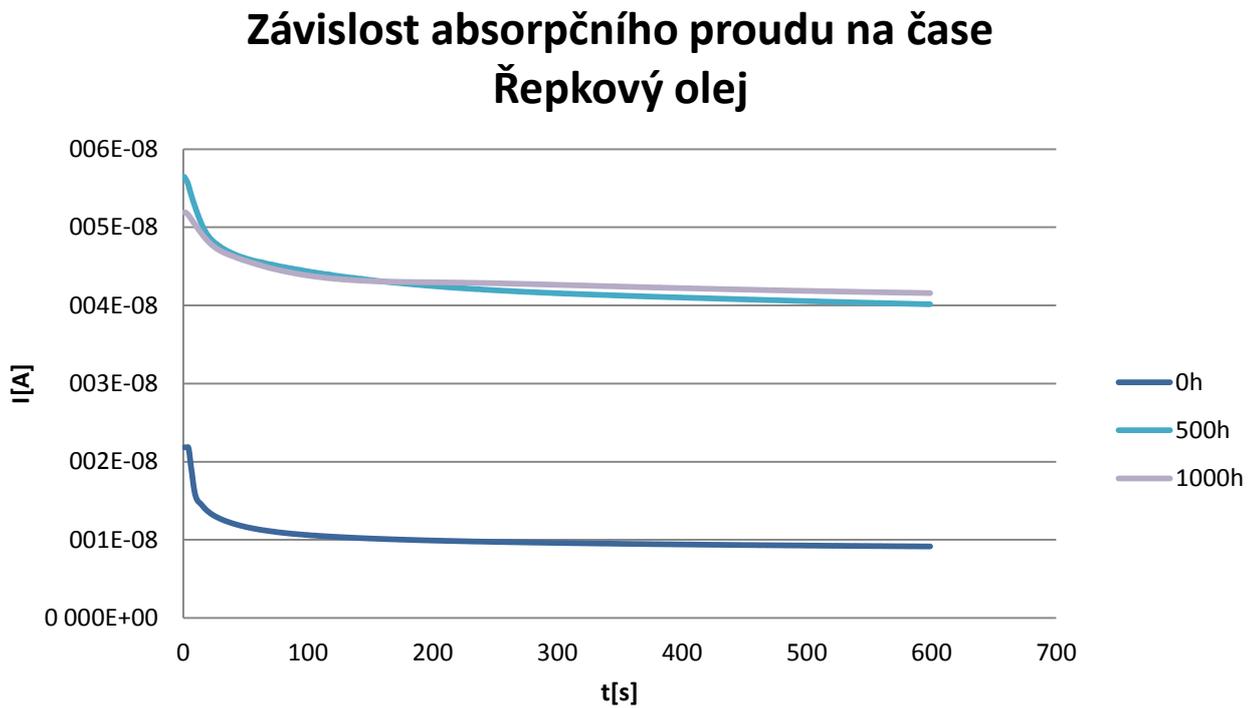


Obr.20: Závislost absorpčního proudu na čase MIDEL 7131.

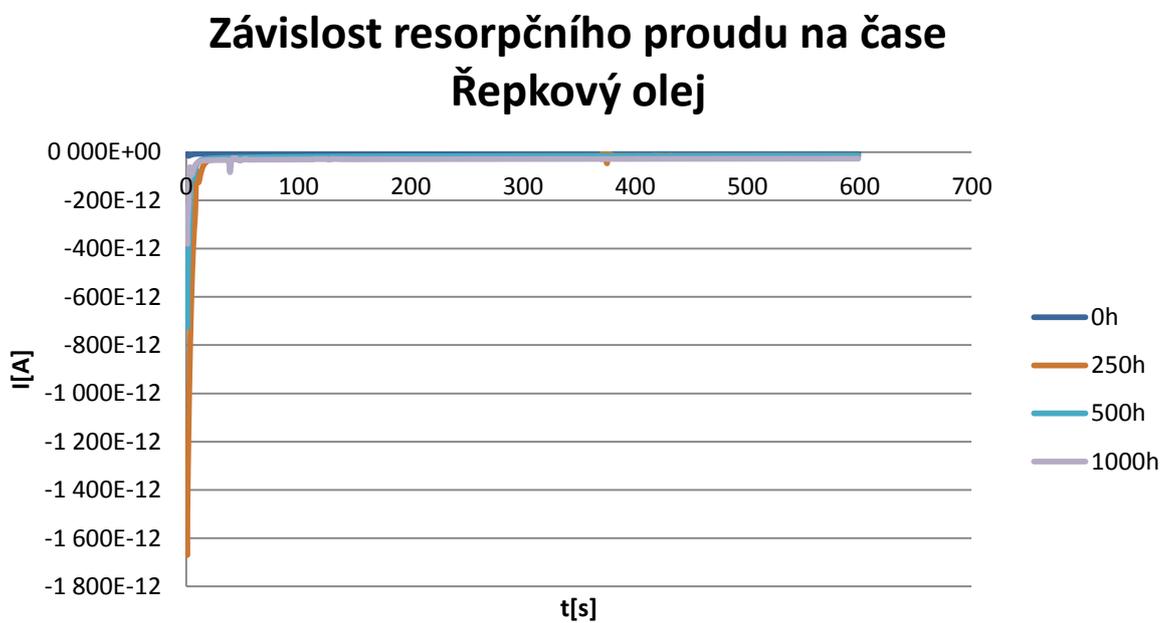
Závislost resorpčního proudu na čase MIDEL 7131



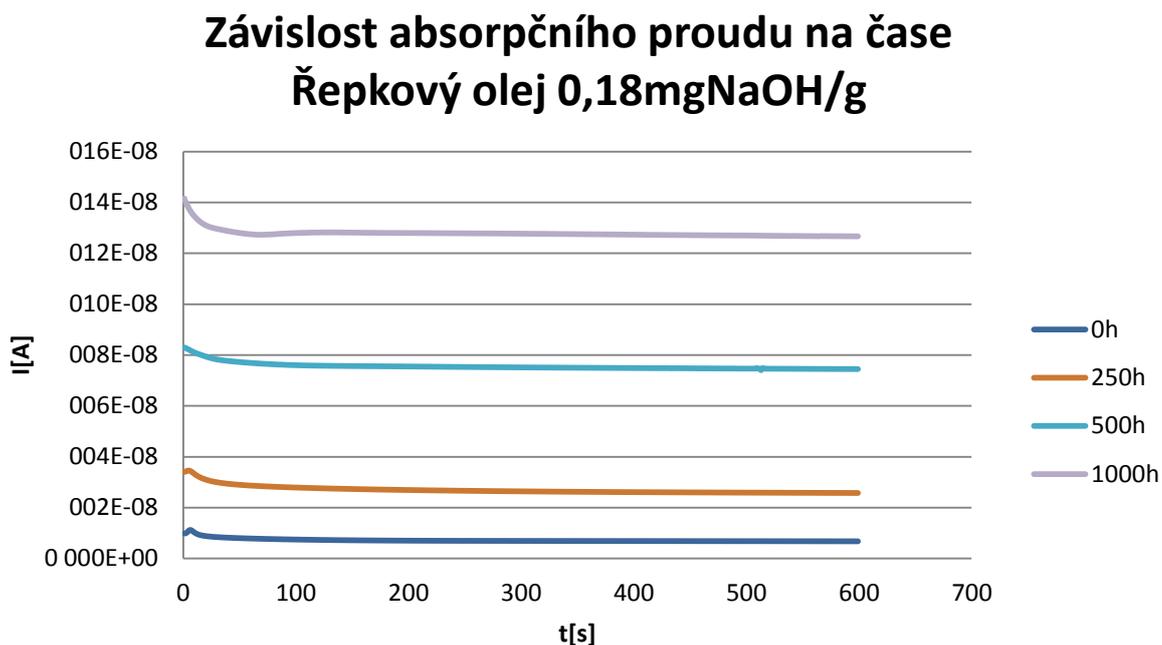
Obr.21: Závislost resorpčního proudu na čase MIDEL 7131.



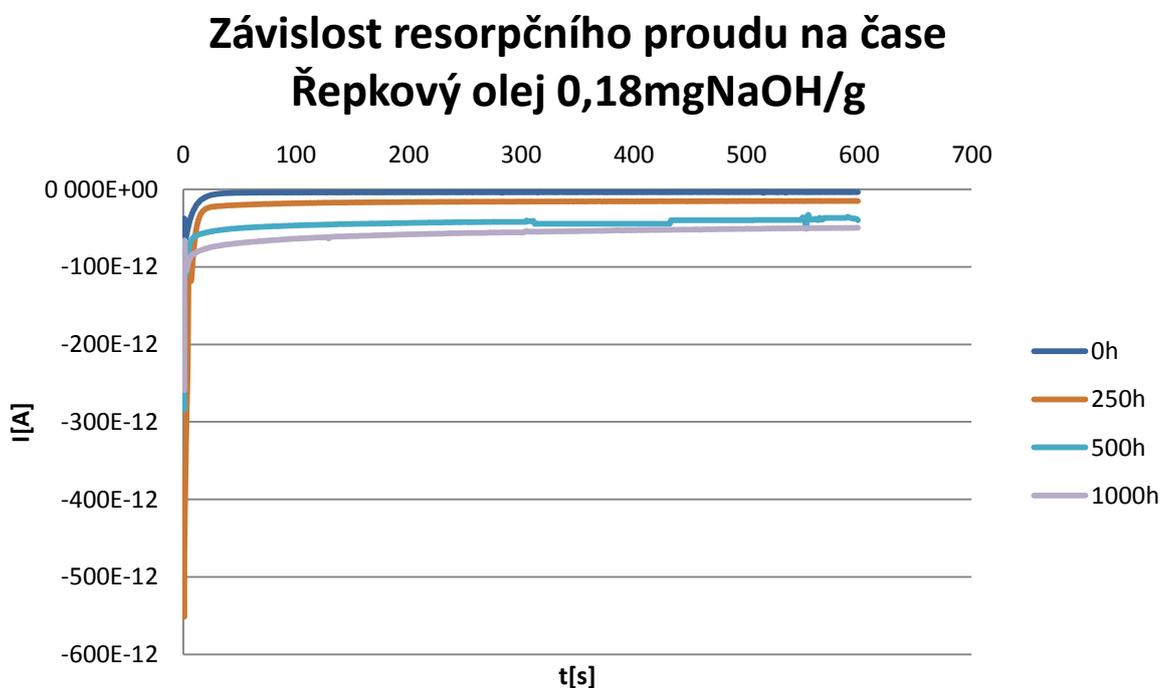
Obr.22: Závislost absorpčního proudu na čase Řepkový olej.



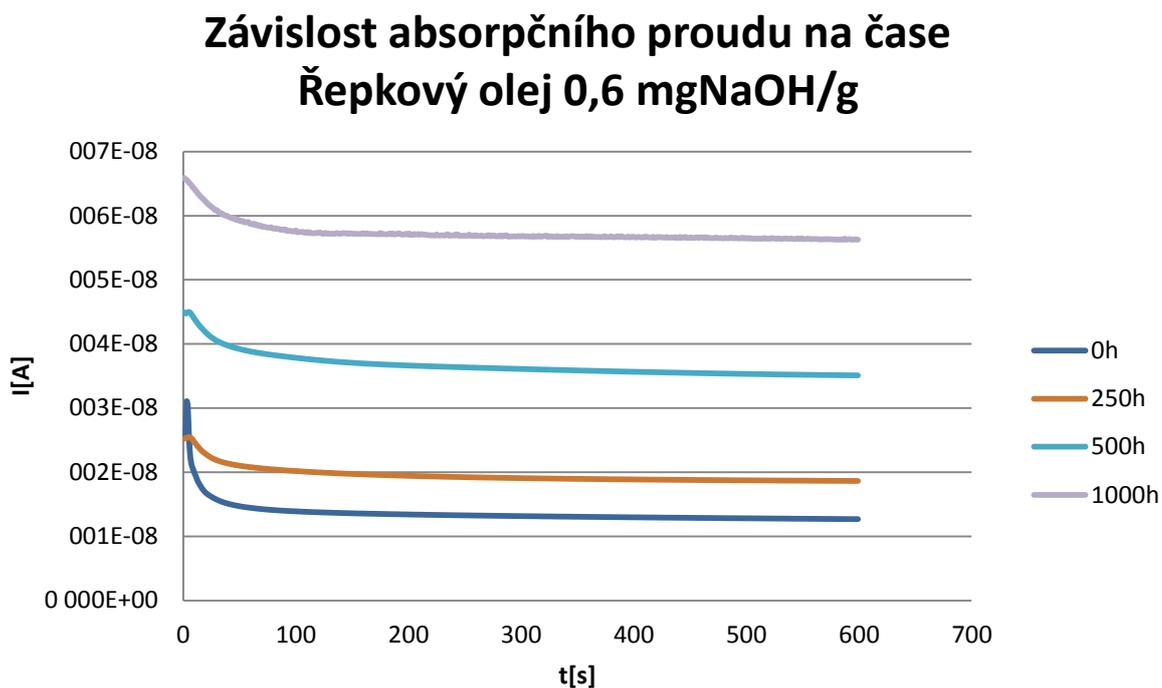
Obr.23: Závislost resorpčního proudu na čase Řepkový olej.



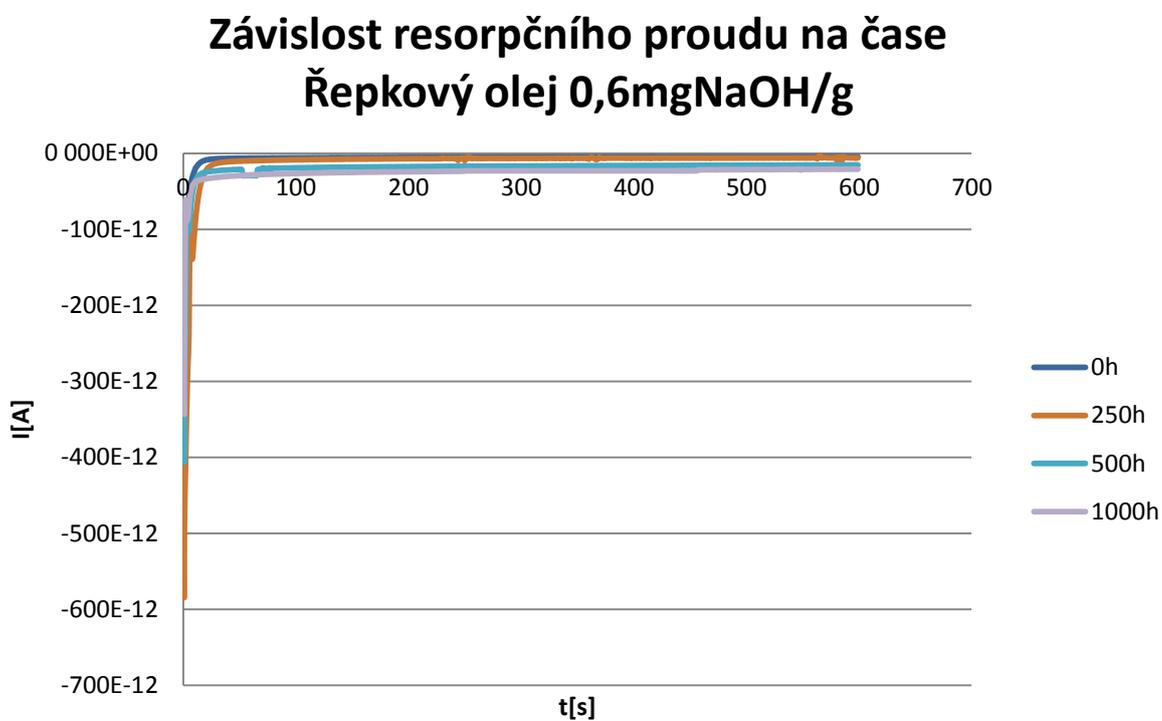
Obr.24: Závislost absorpčního proudu na čase Řepkový olej 0,18mgNaOH/g.



Obr.25: Závislost resorpčního proudu na čase Řepkový olej 0,18mgNaOH/g.

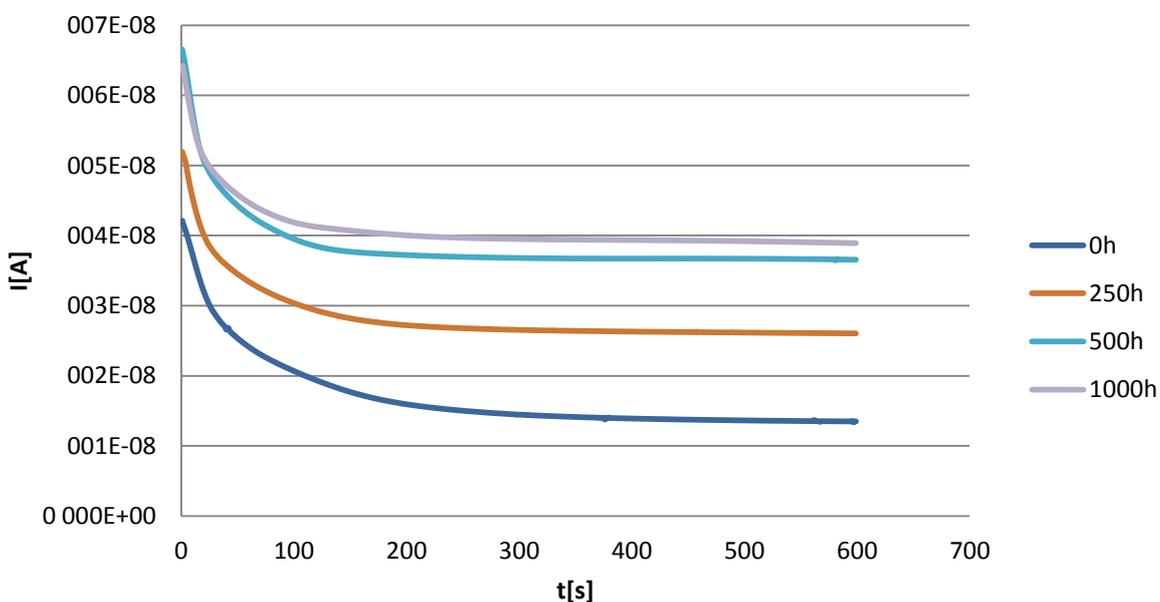


Obr.26: Závislost absorpčního proudu na čase Řepkový olej 0,6 mgNaOH/g.



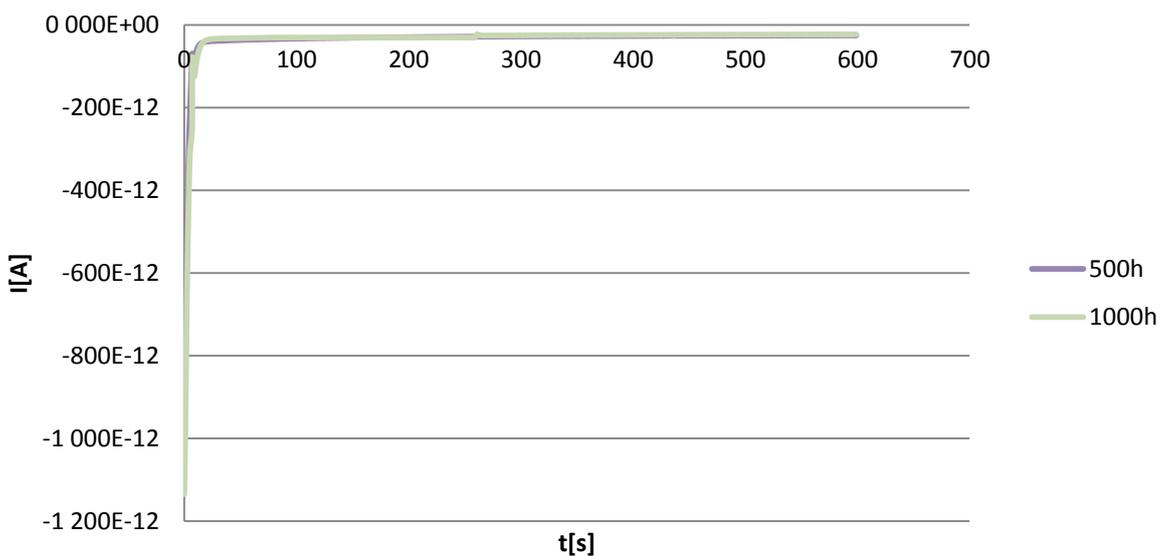
Obr.27: Závislost resorpčního proudu na čase Řepkový olej 0,6mgNaOH/g.

Závislost absorpčního proudu na čase Slunečnicový olej



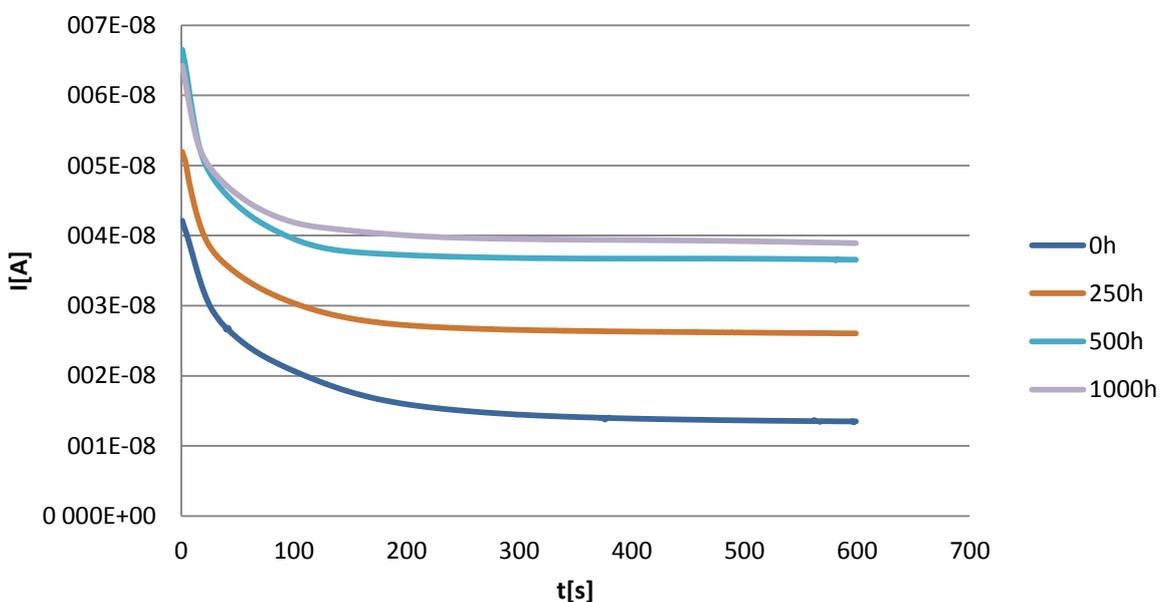
Obr.28 Závislost absorpčního proudu na čase Slunečnicový olej.

Závislost resorpčního proudu na čase Slunečnicový olej 0,6mgNaOH/g



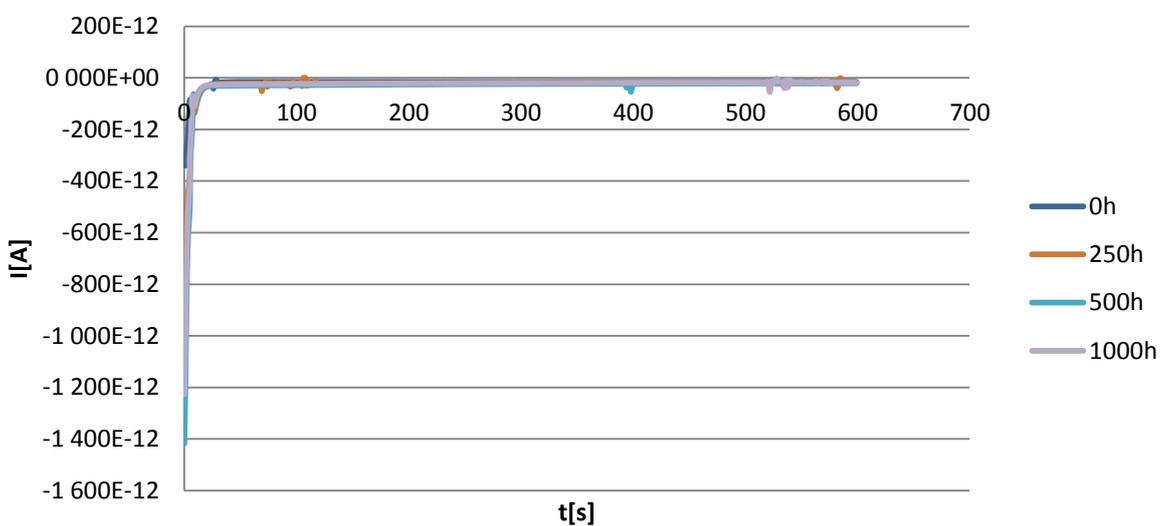
Obr.29: Závislost resorpčního proudu na čase Slunečnicový olej 0,6mgNaOH/g.

Závislost absorpčního proudu na čase Slunečnicový olej



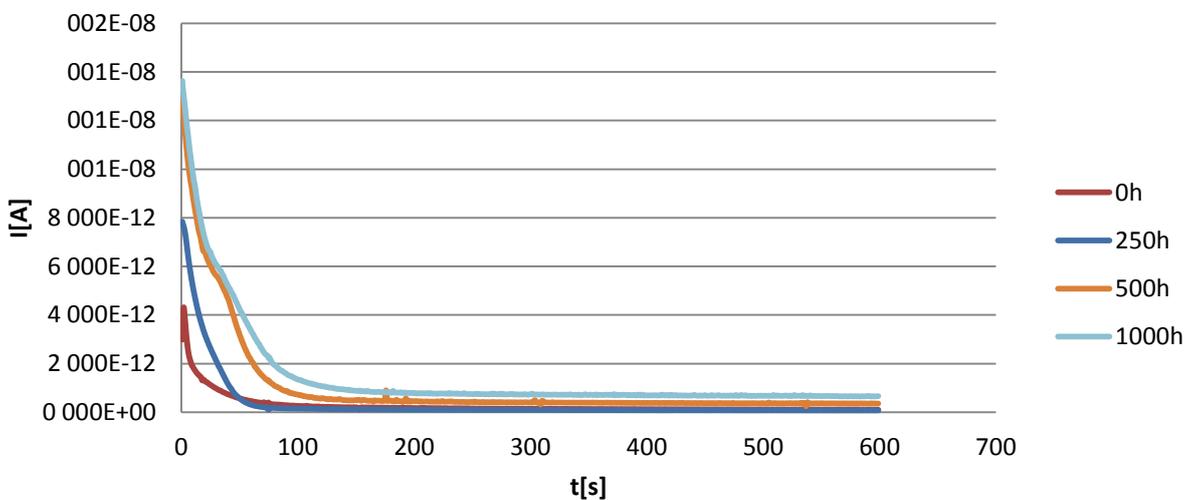
Obr.30: Závislost absorpčního proudu na čase Slunečnicový olej.

Závislost resorpčního proudu na čase Slunečnicový olej



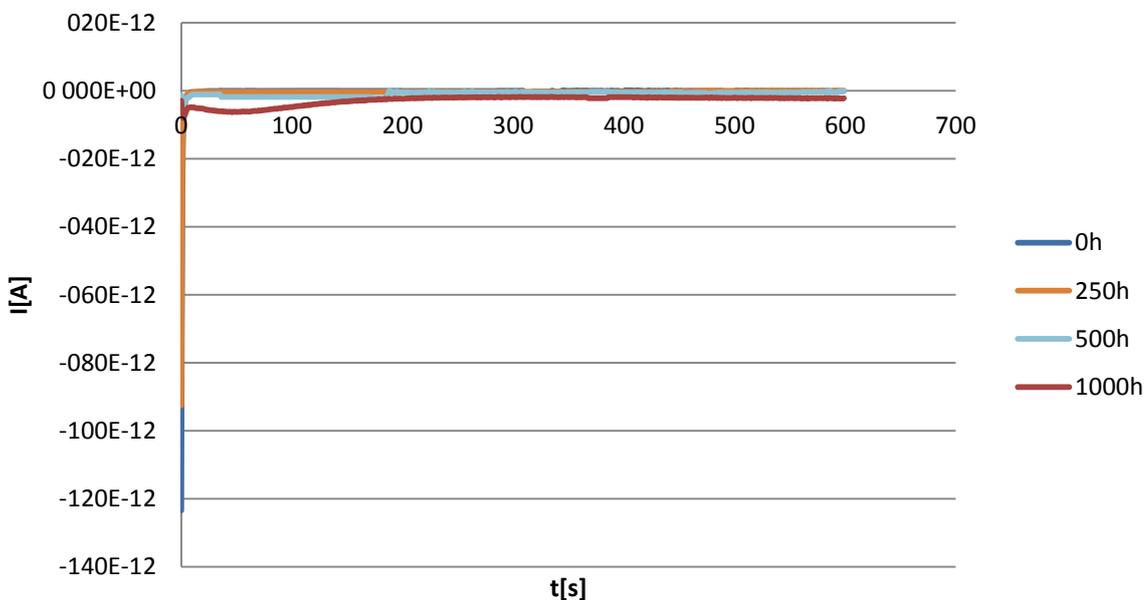
Obr.31: Závislost resorpčního proudu na čase Slunečnicový olej.

Závislost absorpčního proudu na čase Shell Diala dx



Obr.32: Závislost absorpčního proudu na čase Shell Diala dx.

Závislost resorpčního proudu na čase Shell Diala dx



Obr.33: Závislost resorpčního proudu na čase Shell Diala dx.

Měření těchto charakteristik je poměrně citlivé, u části resorpčních charakteristik se vyskytlo občasné kolísání proudu, které byly odstraněny pro větší názornost výsledků. Kolísání bylo pravděpodobně způsobené citlivostí metody na okolní rušení.

3.4.4 Polarizační index

Polarizační index je dalším parametrem, který můžeme získat z absorpčních charakteristik, využívá časovou proměnnost absorpčního proudu. Rozlišujeme dva polarizační indexy, a to jednodominutový a desetiminutový. Jednodominutový je definován jako poměr proudů v patnácté a šedesáté sekundě. Desetiminutový index se vyjadřuje poměr proudů z první a desáté minuty, jak je vidět ve vzorcích (11), (12).

V případě, že se polarizační index blíží k jedné, značí to o velkém počtu volných nosičů náboje v materiálu. To se vyskytuje zejména u navlhle izolace. Oproti tomu u suché a kvalitní izolace by se měl polarizační index co největší.[48]

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} \quad (11)$$

$$p_{i10} = \frac{i_{60}}{i_{600}} \quad (12)$$

kde	p_{i1}	je polarizační index v první minutě [-]
	p_{i10}	je polarizační index v desáté minutě [-]
	i_{15}	je absorpční proud změřený v patnácté sekundě [A]
	i_{60}	je absorpční proud změřený v šedesáté sekundě [A]
	i_{600}	je absorpční proud změřený v šestisté sekundě [A]

Příklad výpočtu:

$$p_{i10} = \frac{7,87 \cdot 10^{-9}}{6,78 \cdot 10^{-9}} = 1,162 \quad (13)$$

3.4.5 Vyhodnocení polarizačního indexu

Druh oleje	0 h		250 h		500 h		1000 h	
	p_{i1}	P_{i10}	p_{i1}	P_{i10}	p_{i1}	P_{i10}	p_{i1}	P_{i10}
Shell diala dx	3,334	4,351	3,323	4,074	3,496	5,955	2,489	5,043
Shell diala dx zestárnutý	1,208	1,228	-	-	-	-	-	-
Transesterifikovaný olej	1	-	-	-	-	-	-	-
Transesterifikovaný olej-převař.	1,004	-	-	-	-	-	-	-
Slunečnicový olej čistý	1,429	1,787	1,267	1,284	1,241	1,176	1,187	1,149
Slunečnicový olej 0,6mgNaOH/g	1,158	1,165	1,032	1,346	1,146	1,133	1,147	1,116
Řepkový olej čistý	1,269	1,238	1,150	1,170	1,103	1,136	1,086	1,088
Řepkový olej 0,6mgNaOH/g	1,243	1,139	1,135	1,115	1,101	1,106	1,074	1,043
Řepkový olej 1,1mgNaOH/g	1,151	1,096	-	-	-	-	-	-
Řepkový olej 0,18mgNaOH/g	1,173	1,162	1,112	1,113	1,042	1,032	1,039	1,007
MIDEL 7131	1,386	2,034	1,308	1,431	1,293	1,418	1,228	1,295

Tab. 10: Zobrazuje polarizační indexi vybraných izolačních kapalin.

Jak je vidět z příložené Tab. 10:, polarizační charakter měl při ohledu na teplené stárnutí klesající charakter, což splnilo předpoklady. Nejlepšími hodnotami polarizačního indexu disponoval minerální olej Shell Diala dx, který se pohyboval s hodnotou p_{i1} v průměru okolo 3,3 a p_{i10} mezi 4 a 5. Oproti tomu nejhorší hodnotu měl transesterifikovaný olej, který měl hodnotu 1, což ukazuje na velký počet volných nosičů náboje, tudíž jako izolační materiál naprosto nevhodný. Syntetický olej MIDEL 7131 se pohyboval v rozmezí hodnot jednodominutového polarizačního indexu od 1,22 do 1,39 a desetiminutového od 1,3 do 2,03. Rostlinné oleje se pohybovaly přibližně na stejné hodnotě polarizačního indexu jako vyřazený zestárnutý Shell Diala dx.

3.4.6 Redukované resorpční křivky (RRK)

Jak již název napovídá, redukované resorpční křivky jsou odvozeny z resorpčního proudu. Tato metoda spočívá v matematickém zpracování průběhů resorpčních proudů. Ty se zpracovávají do tvaru relativních resorpčních charakteristik, kdy aktuální hodnota okamžitého

proudu (závisle proměnné) v čase t se vyjadřuje jako jeho poměr k proudu v 15 vteřině. Transformované souřadnice získáme ze vztahů:

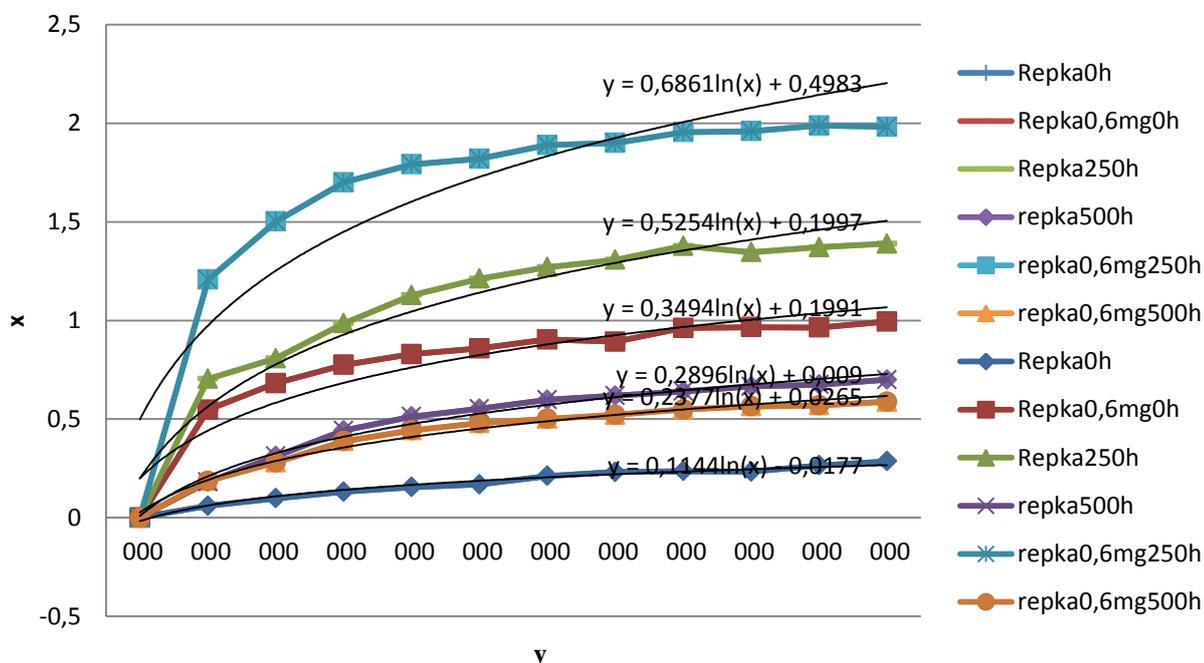
$$x = \ln(t) - \ln(15) \tag{14}$$

$$y = ABS[\ln(i_t) - \ln(i_{15})] \tag{15}$$

kde x, y jsou transformované souřadnice [-],
 t je čas [s],
 i_t je okamžitý proud v čase t [A],
 i_{15} je proud v patnácté vteřině [A].

Z těchto souřadnic získáme redukované resorpční křivky. Výsledným parametrem pro hodnocení vlastností izolačního systému jsou směrnice jejich lineárních náhrad. Platí, pokud má křivka daného izolantu větší směrnici, tím má izolant lepší izolační vlastnosti.

RRK



Obr.31: Resorpční redukované křivky řepkového oleje.

Jak je vidět z Obr. 31: křivky nevyšly podle předpokladu, proto byla lineární regrese spojnice trendu nahrazena regresí logaritmickou, pro lepší aproximaci křivky, nejvyšší hodnota směrnice je u modifikovaného řepkového oleje s množstvím hydroxidu sodného 0,6

mgNaOH/g při teplotě 90 °C, který byl vystaven tepelnému stárnutí po dobu 250 h. Tudiž by měl mít tento vzorek nejlepší izolační vlastnosti.

4 Závěr

Dnešní výzkum se ohledně elektroizolačních kapalin čím dál tím více zaměřuje na vývoj alternativních izolačních kapalin. Důvodů, proč bychom měli nahradit oleje založené na minerální bázi alternativními oleji, je hned několik, můžeme se na tento problém podívat ze strany neustále se ztenčující zásoby ropy nebo z důvodu špatné biologické odbouratelnosti minerálních olejů. Minerální oleje se pohybují s biologickou odbouratelností v rozmezí 20 % až 40 %, to by mohlo mít při havárii zařízení, které využívá minerální olej, fatální následky s ohledem na životní prostředí.

Alternativní izolační kapaliny dominují především v biologické odbouratelnosti, která přesahuje 90 %, také ovšem vykazují velmi dobré elektrické vlastnosti, kde můžeme uvést elektrickou pevnost. Další důležitá vlastnost alternativních izolačních kapalin je vysoký bod vzplanutí, který přesahuje 300 °C, což je výhodně z pohledu požární bezpečnosti.

Pomocí sestaveného diagnostického systému byl změřen ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ v závislosti na teplotě. Nejlepšími výsledky se zde prezentoval minerální olej Shell Diala dx, který si zachoval nízké hodnoty ztrátového činitele po celou dobu tepelné expozice. Hodnota ztrátového činitele zde nepřesáhla 0,01. U rostlinných olejů měl nejnižší hodnotu ztrátového činitele modifikovaný vzorek řepkového oleje s 0,18 mgNaOH/g, ten měl v počátečním stavu tepelné expozice hodnotu $\text{tg } \delta$ nižší než 0,01. Ovšem v průběhu tepelné expozice se jeho parametry zhoršovaly. V době 250 h tepelného stárnutí byl naměřen nejnižší ztrátový činitel u modifikovaného řepkového oleje s 0,6 mgNaOH/g. Měření prokázalo, že je možné brát ztrátový činitel jako ukazatel stárnutí, což bylo také popsáno ve studii.[37], [41]

Dalším zkoumaný parametr byl polarizační index, který vypovídá o izolačních schopnostech daného materiálu, zde opět vyšel nejlépe Shell Diala dx, který si zachoval hodnoty polarizačního indexu okolo 3. Z alternativních kapalin si nejlépe vedl syntetický olej MIDEL 7131.

V průběhu experimentu prokazoval nejlepší vlastnosti minerální olej Shell Diala dx. Pro možnost, využití modifikovaných rostlinných olejů by bylo potřeba podrobit vzorky dalším zkouškám, jako je například elektrická pevnost, viskozita. Ve studii [45] bylo prokázáno, že při dlouhodobém stárnutí slunečnicového oleje podléhal vysychání, což zhoršuje viskozitu, takže použití v neupravené podobě v transformátorech není možné.

Nicméně vidím velkou perspektivu v biologicky odbouratelných kapalinách jak na syntetické bázi, tak na bázi přírodních esterů. Tyto kapaliny se vlastnostmi blíží minerálním olejům, dokonce je převyšují v bodu hoření, elektrické pevnosti a biologické odbouratelnosti.

Jako zástupce syntetických olejů s vysokou biologickou odbouratelností bych vyzdvihl MIDEL 7131 a kapalina na bázi přírodních esterů ENVIROTEMP FR 3. Tyto kapaliny se již v transformátorech používají, bohužel jejich cena je oproti minerálním olejům stále vyšší.

Seznam literatury a informačních zdrojů

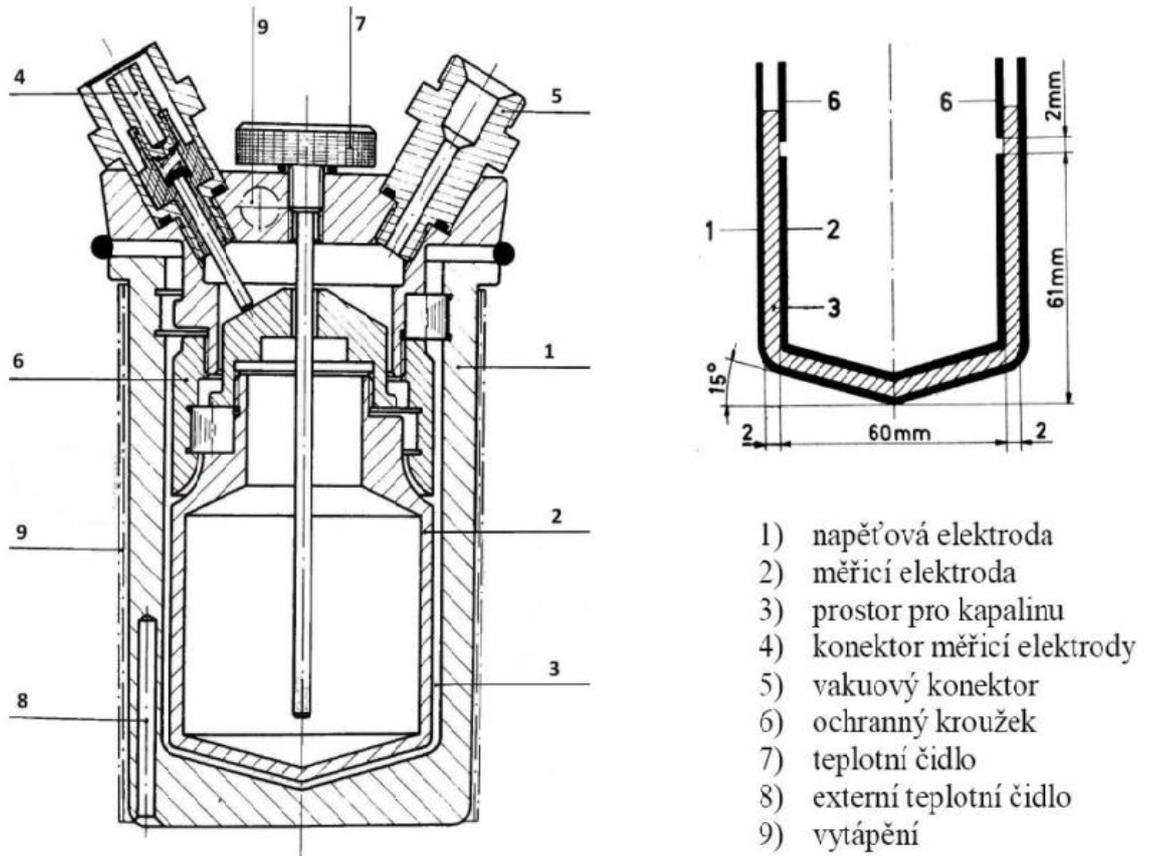
- [1] HASSEDEUTEUFEL, Josef, et al. *Elektrotechnické materiály*. 2. vyd. Praha : STN, 1978. 607 s. ISBN 63-555-78.
- [2] MESHKATODDINI, Mohammad R., et al. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. *American J. of Engineering and Applied Sciences* [online]. 2008, 1, [cit. 2012-11-08]. Dostupný z WWW: <[Janoud.cz](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.idc-online.com%2Ftechnical_references%2Fpdfs%2Felectrical_engineering%2FAging%2520Study%2520and%2520Lifetime%2520Estimation%2520of%2520Transformer%2520Mineral%2520Oil.pdf&ei=49ObULPSGsaL4gSBg4CADw&usg=AFQjCNEu8dHKrwaUr9O-q6R9X9liL9LOvg&sig2=jdCvNayul5WFrQihT7egTg >.????></p><p>[3] MENTLÍK, Václav, et al. <i>Diagnostika elektrických zařízení</i>. 1. vydání. Praha : BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.</p><p>[4] MCGRAW, Hill. <i>Electrical Engineering Materials Reference Guide</i>. 1st ed. USA : MCGRAW-HILL PUBLISHING COMPANY, 1990. 329 s. ISBN 0-07-004196-2.</p><p>[5] <a href=) [online]. c2005 [cit. 2012-11-08]. Janoud. Dostupné z WWW: <http://www.janoud.cz/sub/jcueltech/04b_izolanty.pdf>.
- [6] [Ieee.org](http://www.ieee.org) [online]. 2004 [cit. 2012-11-30]. IEEE. Dostupné z WWW: <<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1461648>>.
- [7] GRZYBOWSKI, S., et al. Electric Properties of Vegetable Oil-Based Dielectric Liquid and Lifetime Estimation of the Oil-Paper Insulation. *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* [online]. 15.-18.10 2006 , n1, [cit. 2012-12-20]. Dostupný z WWW: <<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4105524>>.
- [8] [Cooperindustries.com](http://www.cooperindustries.com) [online]. c2010 [cit. 2012-11-15]. Cooper industries. Dostupné z WWW: <<http://www.cooperindustries.com/content/public/en.html>>.
- [9] Hamerská, J., ROSTLINNÉ OLEJE – SPOTŘEBITELSKÁ SONDA. *Brno, 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně* [online]. 15.-18.10 2006 , n1, [cit. 2012-10-30]. Dostupný z WWW: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fis.muni.cz%2Fth%2F323462%2Fif_b%2Ffinalni_pdf.pdf&ei=bbOjUPnrDpHTsgbruICIAQ&usg=AFQjCNFrWVdpbzyXUR5R9zP5esVf-0_Y7Q&sig2=IJyBOYDVwymYhW6WOROYQQ>.
- [10] SOUČEK, Jakub. Způsoby rafinace a regenerace elektroizolačních kapalin, výhledy do budoucnosti. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [11] BOSS, P. NEW INSULATING FLUIDS FOR TRANSFORMERS BASED ON BIODEGRADABLE HIGH OLEIC VEGETABLE OIL AND ESTER FLUID. [online]. s. 10 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=790746>
- [12] OKÉNKOVÁ, Eva. Vliv rafinace na kvalitativní parametry a stabilitu rostlinných olejů lisovaných za studena. Zlín, 2006. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Pavel Valášek, CSc.
- [13] MARULANDA, A.R. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in

- distribution transformer. [online]. s. 10 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org.dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4641781>
- [14] ŠTĚPINA, Václav. Popis vynálezu k autorskému osvědčení: Syntetický elektroizolační olej. [online]. s. 8 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fspisy.upv.cz%2Fpatents%2FFullDocuments%2F262%2F262875.pdf&ei=qRj1UIHEIujl4QT_54HwDA&usq=AFQjCNEYy9bCRDiVOnZqMG5naEyqQ67cWw&sig2=vRd9ELAxYNWKJvQ7YrqpKA&bvm=bv.41018144,d.bGE
- [15] Diagnostika 09. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-793-3. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CFUQFjAE&url=http%3A%2F%2Fketersv.fel.zcu.cz%3A12100%2Fdiagnostika%2Fimages%2Fstories%2FSbornik%2FSbornik09.pdf&ei=Ah31UKroD4bg4QSQoYC4Aw&usq=AFQjCNFri4WxooZFGbFBkvkGLL-rFC9mJQ&sig2=QLI3UR_C7cVR7Ff_xj2tcg&bvm=bv.41018144,d.bGE
- [16] WATKINS, Cathrine. TRANSFORMING TRANSFORMING the transformer the transformer industry. [online]. s. 3 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDwQFjAB&url=http%3A%2F%2Ffaocs.files.cms-plus.com%2Finform%2F2008%2F8%2F524.pdf&ei=wib1UKePJofk4QTN-IHoDg&usq=AFQjCNG_v6VDbZgwzY5Z-G6Lj1Eidil1oQ&sig2=cUU4UreRSKuef17_p_BG3A&bvm=bv.41018144,d.bGE
- [17] BARBORKA, Vít. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů [online]. [cit. 2013-02-11]. Dostupné z:] http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085
- [18] AUTOR NEUVEDEN. China Suppliers [online]. [cit. 9.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://china-oil-purifier.en.made-in-china.com/productimage/iojQfEtxIvhU-2f0j00mezQTGBCfycO/China-Bdv-Dielectric-Oil-Breakdown-Voltage-Testing-Equipment.html>
- [19] *Cesmina.vscht.cz* [online]. c2011 [cit. 2013-05-3]. CESMINA. Dostupné z WWW: <<http://cesmina.vscht.cz/trp/images/Dokuments/Navody-na-laboratore/Cislo-kyselosti-bac+mag.pdf>>.
- [20] HÁJEK, Jan. Aplikovatelnost izolačních kapalin šetrných k životnímu prostředí. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita Plzeň. Vedoucí práce Ing. Martin Širůček.
- [21] ČERNÝ, Jaroslav. *Znalec.tym.cz* [online]. 2006 [cit. 2013-05-2]. ZNALEC. Dostupné z WWW: <http://www.znalec.tym.cz/03_visk.pdf>.
- [22] ČERNÝ, Jaroslav. Vlastnosti motorových olejů - Palivo v oleji. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Palivo-v-oleji>
- [23] THOMAS, P., et al. Biodegradable dielectric liquids for transformer applications. *IEEE*. 2005, 1, s. 135-135.
- [24] *Oleje.cz* [online]. c2009 [cit. 2011-05-31]. OLEJE. Dostupné z WWW: <http://oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju7>.
- [25] KWIECIEN, Jiří. SEPARACE REAKČNÍ SMĚSI PO TRANSESTERIFIKACI ŘEPKOVÉHO OLEJE. Pardubice, 2006. Dostupné z: <https://dspace.upce.cz/bitstream/10195/15909/1/D15342.pdf>. Diplomová práce. UNIVERZITA PARDUBICE FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ.

- [26] *INTRODUCTION OF A NEW FULLY BIODEGRADABLE DIELECTRIC FLUID. IEE [online]. 1998, 1, [cit. 2011-05-31]. Dostupný z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/search/freesrchabstract.jsp?tp=&arnumber=679223&queryText%3DINTRODUCTION+Abstruct++The+development+of+OF+A+NEW+FULLY+BIODEGRADABLE+DIELECTRIC+FLUID%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All>.*
- [27] HORUTOVÁ. Laboratorní práce č.9. Lipidy [online]. s. 7 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.gsos.cz/man/chem/pk.Z-LP9-3-Lipidy.pdf>
- [28] *Zajímavé chemické experimenty s látkami každodenního života. Praha, 2008. Dostupné z: <http://www.natur.cuni.cz/~kudch/main/JPD3/>. Publikace. UK Praha.*
- [29] REŇAK, L. ELEKTRICKÁ VODIVOST ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN. BRNO, 2011. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [30] *INTRODUCTION OF A NEW FULLY BIODEGRADABLE DIELECTRIC FLUID. IEE [online]. 1998, 1, [cit. 2011-05-31]. Dostupný z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/search/freesrchabstract.jsp?tp=&arnumber=679223&queryText%3DINTRODUCTION+Abstruct++The+development+of+OF+A+NEW+FULLY+BIODEGRADABLE+DIELECTRIC+FLUID%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All>.*
- [31] *MIDEL: Natural Ester Dielectric Insulating Fluid Overview. 2012, s. 2. Dostupné z: http://static.mimaterials.com/midel/documents/technical/MIDEL_eN_Dielectric_Insulating_Fluid_Overview.pdf*
- [32] *Midel.com [online]. 2010 [cit. 2013-05-3]. MIDEL. Dostupné z WWW: <http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/MIDEL_7131_Complete_Binder_of_Data_Sheets.pdf>.*
- [33] JEŘÁBEK, M. ANALÝZA VÍCEFAKTOROVÉHO NAMÁHÁNÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ. BRNO, 2009. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Zdeňka Rozsivalová.
- [34] BARBORKA, Vít. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085
- [35] *REGENERACE TRANSFORMÁTOROVÝCH A TURBÍNOVÝCH OLEJŮ. [online]. s. 12 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>*
- [36] *Zkoušky oxidační stability izolačních olejů. In: Zkoušky oxidační stability izolačních olejů [online]. 2013 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/zkousky-oxidacni-stability-izolacnich-oleju>*
- [37] *DIAGNOSTIKA VLASTNOSTÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN. BRNO, 2010. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28700. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.*
- [38] *Bc. ŠIRŮČEK, Martin. Degradace izolačních systémů – elektrické stromečky. Plzeň, 2009. Diplomová. Západočeská univerzita. Vedoucí práce Ing. Pavel Trnka Ph.D.*
- [39] *PROSR, P, J PIHERA, R POLANSKÝ a P TRNKA. Teplotní stabilita izolačních kapalin. [online]. s. 4 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/62.pdf>*
- [40] *Comparative Study of the Thermal Degradation of Synthetic and Natural Esters and Mineral Oil: Effect of Oil Type in the Thermal Degradation of Insulating Kraft Paper. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2012, Vol. 28, No.2, s. 22-28.*
- [41] *MESHKATODDINI, Mohammad R. Aging Study and Lifetime Estimation of*

- Transformer Mineral Oil. American J. of Engineering and Applied Sciences. 2008, roč. 4, č. 1, s. 384-388.*
- [42] ČSN IEC 60076-7. Výkonové transformátory - Část 7: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů. Czech: Český normalizační úřad, 2007
- [43] ANALÝZA VÍCEFAKTOROVÉHO NAMÁHÁNÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ. BRNO, 2009. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7101/DP_Je%C5%99%C3%A1bek_Michal.pdf?sequence=1. Diplomová. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [44] MRÁZ, Petr. Posouzení stárnutí izolačních systémů sledováním výbojové činnosti. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Vedoucí práce prof. Ing. Václav Mentlík, Csc.
- [45] MENTLÍK, V, P TRNKA a M ŠIRŮČEK. TEPELNÉ STÁRNUTÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRANSFORMÁTORŮ. 2010, s. 4.
- [46] GOCKENBACH, E. Partial discharge behaviour, permittivity and dissipation factor $\tan \delta$. Research project on the comparison of electric and dielectric properties of natural Ester fluid with a synthetic Ester and a Mineral based transformer oil [online]. 2005, No.2 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:
http://www.spxtransformersolutions.com/assets/documents/15HanoverReport_2.pdf
- [47] VÁCLAV, Mentlík. TRNKA, Pavel. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie. Praha: BEN, 2011. ISBN 978-80-7300-41-5.
- [48] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [49] ČSN EN 60247. Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ($\tan \delta$) a rezistivity při stejnosměrném napětí. Český normalizační institut, 2005.

Přílohy



Obr.32: Vnitřní schéma měřicího systému. Převzato [29].



MIDEL® eN

Natural Ester Dielectric Insulating Fluid Overview

October 2012 Page 1 of 2

MIDEL eN Product Overview

MIDEL eN is a natural ester-based dielectric fluid that is manufactured from renewable, edible seed oil. MIDEL eN has been formulated to provide a cost effective fluid for use in sealed transformers under temperate climate conditions. It is also ideally suited to indoor installations where fire safety is a priority.

MIDEL eN offers increased fire safety, greater environmental protection and superior moisture tolerance. Testing has also demonstrated that MIDEL eN has excellent dielectric properties.

Areas of Application

MIDEL eN is primarily suited to use in sealed distribution and power transformers. Unlike synthetic ester-based MIDEL 7131, it is not suitable for use in breathing transformers.

- ▶ Distribution transformers
- ▶ Power transformers
- ▶ Rectifier transformer
- ▶ Pole-type transformers

Retrofilling

MIDEL eN may be used for retrofilling mineral oil distribution transformers that are of a sealed design in order to reduce environmental hazards or increase fire safety.

Corrosive Sulphur

MIDEL eN has been tested by independent laboratories to ASTM D1275 B and IEC 62535, it was found to be non-corrosive.

Increased Fire Safety

Having a >300°C fire point and a net calorific value <42MJ/kg, MIDEL eN is classified as a K2 class liquid as defined in IEC 61039.

- ▶ 100% fire safety record
- ▶ High fire point (>300°C)
- ▶ K-class to IEC 61039
- ▶ Reduced fire safeguarding costs

Greater Environmental Protection

MIDEL eN is an environmentally friendly alternative to conventional transformer fluids because it is classified as readily biodegradable and non-water hazardous. It also has a lower carbon footprint than mineral oil based fluids due to the renewable raw materials used during manufacture.

- ▶ Readily biodegradable (OECD 301)
- ▶ Fully biodegradable (IEC 61039)
- ▶ Classified as non-water hazardous by UBA
- ▶ Non-toxic
- ▶ Manufactured from renewable raw materials
- ▶ Will not evaporate into the environment
- ▶ RoHS compliant

Moisture Tolerance

MIDEL eN is moisture tolerant and can absorb far more water than mineral oil, without compromising the breakdown voltage.

- ▶ No reduction of breakdown voltage (up to 300ppm / 20°C)
- ▶ Allows moisture to migrate from cellulose into the fluid
- ▶ Potentially keeps the cellulose drier and slows the rate of ageing
- ▶ High saturation limit making condensation virtually impossible
- ▶ Reduced risk of bubble formation

Delivery

MIDEL eN can be delivered in 23kg, 184kg or 920kg sealed containers; bulk tanker deliveries available for >20 tonnes.

Disposal

For disposal, it is recommended that used MIDEL eN or remains of the insulating fluid be burnt in a suitable installation.

www.midel.com

Any recommendation or suggestion relating to the use, storage, handling or properties of the products supplied by MBI Materials Ltd either in sales and technical literature or in response to a specific enquiry or otherwise is given in good faith, but it is for the customer to satisfy itself of the suitability of the product for its own particular purposes. © Registered Trade Mark.



MIDEL® eN

Natural Ester Dielectric Insulating Fluid Overview

October 2012 Page 2 of 2

Table 1 - Characterisation of Natural Ester Dielectric Fluid

	Unit	Test Method	Requirement	MIDEL eN Typical values
Physical Properties				
Appearance	-	IEC 61099 7.1.2	clear, free from suspended matter and sediment	clear, free from suspended matter and sediment
Density at 20 °C	kg/dm ³	ISO 3675	max. 1.00	0.92
Kinematic Viscosity at 40 °C 100 °C	mm ² /s	ISO 3104	max. 50 max. 15	37 9.3
Flash Point	°C	ISO 2592	min. 250	327
Fire Point	°C	ISO 2592	min. 300	360
Pour Point	°C	ISO 3016	max. -10	-31
Chemical Properties				
Water Content	mg/kg	IEC 60814	max. 200	50
Neutralisation Value	mg KOH/g	IEC 62021	max. 0.06	<0.03
Net Calorific Value	MJ/kg	ASTM D 240-02	<42	37.5
Dielectric Properties				
Breakdown Voltage	kV	IEC 60156	min. 35	>75
Dielectric Dissipation Factor Tan δ at 90 °C and 50 Hz	-	IEC 60247	max. 0.05	<0.003

Data quoted above are typical values, may be altered without notice and do not constitute a specification

www.midel.com

Any recommendation or suggestion relating to the use, storage, handling or properties of the products supplied by M&I Materials Ltd either in sales and technical literature or in response to a specific enquiry or otherwise is given in good faith, but it is for the customer to satisfy itself of the suitability of the product for its own particular purposes. © Registered Trade Mark.



Technical Data Sheet

Shell Diala Oil DX

Very High performance insulating oil

Shell Diala DX is manufactured from specially refined naphthenic feedstock with ultra-low sulphur content. It offers very high oxidation stability, excellent dielectric and low temperature properties.

Shell Diala DX meets both the established and new industry copper corrosion tests.

Applications

• **Transformers**

All Power transformer types and applications (e.g. generator transformers, shunt reactors, distribution transformers)

• **Electrical equipment**

Components such as rectifiers, circuit breakers and switchgear.

Advice on applications not covered in this leaflet may be obtained from your Shell Representative.

Performance Features and Benefits

• **Excellent oxidation stability**

Shell Diala DX is inhibited with a proven anti-oxidant and shows outstanding oxidation performance. This enables Shell Diala DX to be used in highly loaded application and providing long oil life.

• **Very good dielectric properties**

Meets the requirements of all major specifications.

• **Anti corrosion properties**

Shell Diala DX is based on an ultra low sulphur base oil, making it intrinsically non-corrosive towards copper, with no need for passivation. Diala DX meets all relevant tests on copper corrosion, namely the established DIN 51353 (Silver Strip Test) and ASTM D1275, and also the newer tests: IEC 62535 and ASTM D1275B.

• **Very good low temperature properties**

The naphthenic nature of the feedstock of Diala DX provides a superior low temperature performance without the use of additives.

• **Very good heat transfer characteristics**

The very good fluidity of the oil ensures proper heat transfer inside the transformer, even from lowest starting temperatures.

• **Low water content of delivered oil**

Diala DX is available in drums and pails (and in restricted regions in bulk) as "Shell Diala DX dried", specially handled to retain a high breakdown voltage as delivered. This enables the product to be used in many applications without further treatment.

Specifications and Approvals

Shell Diala DX meets the following specifications:

IEC 60296 (2003)

Table 2 Transformer Oil (I) (Inhibited oil)

Section 7.1 ("Higher oxidation stability..")

Boader oxidation test of (obsolete) DIN 57370-1 (1978)

Storage precautions

The critical electrical properties of Shell Diala DX are easily compromised by trace contamination with foreign material. Typically encountered contaminants include moisture, particles, fibres and surfactants. Therefore, it is imperative that electrical insulating oils be kept clean and dry. It is strongly recommended that storage containers be dedicated for electrical service and include air-tight seals. It is further recommended that electrical insulating oils are stored indoors in climate-controlled environments.

Health & Safety

Guidance on Health and Safety are available on the appropriate Material Safety Data Sheet, which can be obtained from your Shell representative.

Shell Diala DX is free of polychlorinated biphenyls (PCB).

Protect the environment

Take used oil to an authorised collection point. Do not discharge into drains, soil or water.

Technical Data Sheet

Shell Diala Oil DX

Typical Physical Characteristics

Property	Units	Method	Specification requirements	Shell Diala DX
			IEC 60296 Table 2 + section 7.1	
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment and suspended matters	Complies
Density at 15 °C	kg/m ³	ISO 3675	-	881
Density at 20 °C	kg/m ³	ISO 3675	Max. 895	878
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s	ISO 3104	Max. 12	8,0
Kinematic viscosity at -30 °C	mm ² /s	ISO 3104	Max. 1.800	720
Flashpoint P.M.	°C	ISO 2719	Min. 135	138
Pourpoint	°C	ISO 3016	Max. -40	-60
Neutralisation value	mg KOH/g	IEC 62021-1	Max. 0,01	< 0,01
Corrosive Sulphur		DIN 51353	Not corrosive	Not corrosive
Corrosive Sulphur		IEC 62535	-	Not corrosive
Corrosive Sulphur		ASTM D 1275 B	-	Not corrosive
Breakdown voltage Untreated After treatment	kV	IEC 60156	Min. 30 Min. 70	>30 >70
Dielectric dissipation factor (DDF) at 90 °C		IEC 60247	Max. 0,005	0,001
Oxidation Stability (500 h / 120 °C) Total acidity Sludge Dielectric dissipation factor (DDF) at 90 °C	mg KOH/g %m	IEC 61125 C	Max. 0,3 Max. 0,05 Max 0,05	0,02 0,01 0,005
Oxidation Stability Baader (28 d /110 °C) Neutralisation value Sludge content Dielectric dissipation factor (DDF) at 90 °C	mg KOH/g % m	DIN 51554	- - -	<0,03 <0,006 0,005

These characteristics are typical of current production.
Whilst future production will conform to Shell's specification, variations in these characteristics may occur.