

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv vlhkosti na EIS olej – papír**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Patrik FRIČL**  
Osobní číslo: **E17N0009P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vliv vlhkosti na EIS olej - papír**  
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. Uveďte různé druhy elektroizolačních kapalin s výhledem jejich používání do budoucnosti.
2. Popište degradační pochody v celulósovém papíru.
3. Popište degradační pochody v přírodních esterech.
4. Navrhněte ověřovací experiment.
5. Proveďte experiment zrychleného stárnutí.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, Trnka a kol., Diagnostika elektrických zařízení, BEN
2. Mentlík, Trnka a kol. Spolehlivost elektrických zařízení, BEN
3. IEEE Xplore databáze
4. Technické normy

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**

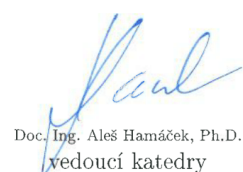
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na chování elektroizolačního systému rostlinný olej – papír, zejména na vliv vlhkosti a teploty na stárnutí systému. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány vlastnosti, výroba a využití minerálních olejů, rostlinných olejů a syntetických kapalin a také možnost využití jednotlivých kapalin v budoucnosti. Dále jsou v práci popsány vybrané elektrické i neelektrické parametry elektroizolačních kapalin. Poslední kapitola teoretické části je věnována degradačním procesům v celulóзовém papíru a přírodních esterech. Praktickou částí práce je experiment vlivu vlhkosti a teploty na elektroizolační systém. V práci je popsán postup experimentu od přípravy vzorků po měřicí metody a následné vyhodnocení naměřených hodnot.

## **Klíčová slova**

Rostlinný olej, přírodní ester, Envitrafol, degradační proces, stárnutí, ztrátový činitel, vlhkost, teplota, permitivita, obsah vody, číslo kyselosti, řepkový olej, dielektrická spektroskopie

## **Abstract**

This diploma thesis describes the behavior of electro-insulation system vegetable oil – paper, especially the influence of humidity and temperature on system aging. The thesis is divided into the theoretical and practical part. Properties, production, and use of mineral oils, vegetable oils, and synthetic liquids are described in the first chapter. Furthermore, in the theoretical part are described electrical and non-electrical parameters and degradation processes in cellulose paper and natural esters. The practical part is focused on the experiment of the influence of humidity and temperature on the aging of the electro-insulation system. The procedure of the experiment from sample preparation to measuring methods and evaluation of measured values are described in the thesis.

## **Key words**

Vegetable oil, natural ester, Envitrafol, degradation process, aging, loss factor, humidity, temperature, permittivity, water content, acid number, rapeseed oil, dielectric spectroscopy

## 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 24.5.2019

Bc. Patrik Fričl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Hornakovi, Ph.D. za praktické rady při měření a naměření hodnot přístrojem Novocontrol Alpha A a Ing. Pavlu Prosovi Ph.D. za naměření FTIR analýzy.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ELEKTROIZOLAČNÍ KAPALINY</b> .....	<b>13</b>
1.1 MINERÁLNÍ OLEJE .....	13
1.2 ROSTLINNÉ OLEJE.....	16
1.3 SYNTETICKÉ OLEJE .....	18
1.4 VYUŽITÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN V BUDOUCNOSTI .....	20
<b>2 VYBRANÉ VLASTNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN</b> .....	<b>22</b>
2.1 VNITŘNÍ REZISTIVITA .....	22
2.2 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	22
2.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL .....	23
2.4 RELATIVNÍ PERMITIVITA .....	25
2.5 BARVA .....	25
2.6 BOD TEKUTOSTI.....	26
2.7 BOD VZPLANUTÍ A BOD HOŘENÍ.....	26
2.8 VIZKOZITA .....	27
2.9 OBSAH VODY.....	28
2.10 ČÍSLO KYSELOSTI .....	28
2.11 VLIV NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ.....	28
<b>3 DEGRADAČNÍ PROCESY V EIS OLEJ – PAPIR</b> .....	<b>30</b>
3.1 DEGRADAČNÍ PROCESY V CELULÓZOVÉM PAPIRU .....	30
3.2 DEGRADAČNÍ PROCESY V PŘÍRODNÍCH ESTERECH .....	36
<b>4 EXPERIMENT ZRYCHLENÉHO STÁRNUTÍ</b> .....	<b>40</b>
4.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	40
4.2 MĚŘENÍ OBSAHU VODY A ČÍSLA KYSELOSTI VZORKŮ .....	41
4.3 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A PERMITIVITY OLEJE.....	43
4.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A PERMITIVITY LEPENKY .....	45
4.5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	46



<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>62</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>67</b>

## Seznam symbolů a zkratk

### Symbole proměnných a konstant

Zkratka	Jednotka	Význam
$C$	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	konstanta viskozimetru
$c$	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	rychlost světla
$C_0$	(F)	kapacita vakuového kondenzátoru
$C_N$	(F)	kapacita kapacitního normálu
$C_x$	(F)	kapacita kondenzátoru s daným dielektrikem
$E$	$(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	energie fotonu
$E_p$	$(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	elektrická pevnost
$h$	(J·s)	Planckova konstanta
$I_{abs}$	(A)	absorpční proud
$i(t)$	(A)	měřící napětí pro BDS
$I_0$	(A)	amplituda proudu
$I_c$	(A)	proud bezeztrátových polarizací
$I_N$	(A)	proud protékající kapacitním normálem
$I_{pros}$	(A)	vodivostní proud
$I_x$	(A)	proud protékající kondenzátorem s měřeným dielektrikem
$N_a$	$(\text{mol}^{-1})$	Avogadrova konstanta
$R_v$	( $\Omega$ )	vnitřní elektrický odpor
$t$	(s)	střední doba průtoku viskozimetru
$tg \delta$	(-)	ztrátový činitel
$U$	(V)	napětí
$u(t)$	(V)	měřící proud pro BDS
$U_p$	(kV)	přeskokové napětí
$U_{rms}$	(V)	měřící napětí
$\alpha$	(-)	parametr popisující šířku relaxačního spektra
$\beta$	(-)	parametr popisující asymetrii disperzní křivky
$\varepsilon'$	(-)	reálná permitivita
$\varepsilon''$	(-)	komplexní permitivita
$\varepsilon^*$	(-)	komplexní permitivita
$\varepsilon_0$	$(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	permitivita vakua
$\varepsilon_\infty$	(-)	permitivita při frekvenci blížící se nekonečnu
$\varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita
$\varepsilon_s$	(-)	statická permitivita
$\eta$	(Pa·s)	dynamická viskozita
$\lambda$	(nm)	vlnová délka
$\nu$	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	kinematická viskozita
$\rho$	$(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	hustota kapaliny
$\rho_v$	( $\Omega \cdot \text{m}$ )	vnitřní rezistivita

### Zkratky

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
PCB	polychlorované bifenyly
ppm	jedna miliontina
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
kat	katalyzátor
HV	vysoké napětí
BDS	širokopásmová dielektrická spektroskopie

## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na vliv vlhkosti a teploty na elektroizolační systém olej – papír s použitím přírodního esteru. Elektroizolační systém olej – papír se využívá v transformátorech. Kde je vinutí transformátoru ovinuto papírovou páskou a nádoba v níž jsou vinutí a kostra transformátoru uloženy je naplněna elektroizolačním olejem. Přírodní estery jsou jednou z alternativ k dnes nejvíce rozšířeným minerálním olejům. Minerální oleje jsou z pohledu elektroizolačních a chladících vlastností spolehlivým médiem pro využití v transformátorech [1]. Hlavní nevýhody minerálních olejů jsou špatná biologická rozložitelnost, karcinogenita a ropa, ze které se minerální oleje vyrábí.

V posledních letech je implementována politika chránit životní prostředí, například v energetice lze vidět trend snižování závislosti výroby elektrické energie na fosilních palivech a nahrazování uhelných elektráren obnovitelnými zdroji energie [2]. Tento trend lze předpokládat i v jiných odvětvích, například u transformátorů plněných elektroizolačními oleji, kde by minerální oleje mohly nahradit právě přírodní estery.

Přírodní estery jsou dobře biologicky rozložitelné [3] a lze je vyrobit z místních surovin, jelikož jsou vyráběny z rostlinných olejů, a to z řepkových, slunečnicových apod. Společnosti zabývající se výrobou transformátorů již vyrábí i přírodní estery, které splňují požadavky na elektrické i neelektrické vlastnosti pro elektroizolační média v transformátorech.

Problémem při využívání přírodních esterů je neznalost jejich dlouhodobého chování a vlivy vnějších faktorů na elektroizolační systém papír – přírodní ester. S touto problematikou souvisí nedostatek norem, které by popisovaly, jak provozovat zařízení s tímto elektroizolačním systémem. Z tohoto důvodu je praktická část práce zaměřena na experiment, ve kterém byl měřen vliv vlhkosti a teploty na elektrické i neelektrické vlastnosti elektroizolačního systému papír – přírodní ester.

# 1 Elektroizolační kapaliny

V elektrotechnice mají elektroizolační kapaliny neboli kapalné izolanty široké použití, využívají se jako izolanty a zároveň s ohledem na jejich schopnost dobře odvádět teplo také jako chladicí médium. Kapalné izolanty mají nízkou viskozitu, pomocí které dobře vyplňují daný prostor, a to včetně porů tuhých izolantů, kde snižují jejich elektrické namáhání a také možnost vzniku elektrických výbojů [1]. Výše zmíněných vlastností se využívá nejvíce v transformátorech [4], ale i v kabelech nebo kondenzátorech [1]. Podle jejich původu lze elektroizolační kapaliny rozdělit na minerální oleje, rostlinné oleje a syntetické kapaliny [1], které jsou někdy nazývány také jako syntetické oleje [5].

Pro správné použití elektroizolačních kapalin je podstatné znát jejich vlastnosti a změny vlastností s ohledem na degradační faktory, těmi mohou být vlhkost, teplota, napětí, záření apod. U elektroizolačních kapalin se sleduje mnoho parametrů. Výrobci kapalin nejčastěji uvádí ve svých produktových listech [6]–[9] tyto elektrické vlastnosti - vnitřní rezistivita, elektrická pevnost, ztrátový činitel a permitivita. Kapalina musí splňovat požadavky i s ohledem na neelektrické vlastnosti, v tomto případě výrobci nejčastěji uvádí barvu kapaliny, bod tekutosti, body vzplanutí a hoření, viskozitu, obsah vody v kapalině, číslo kyselosti a biodegradabilitu. Zmíněné vlastnosti a způsoby měření jsou popsány v kapitole 2.

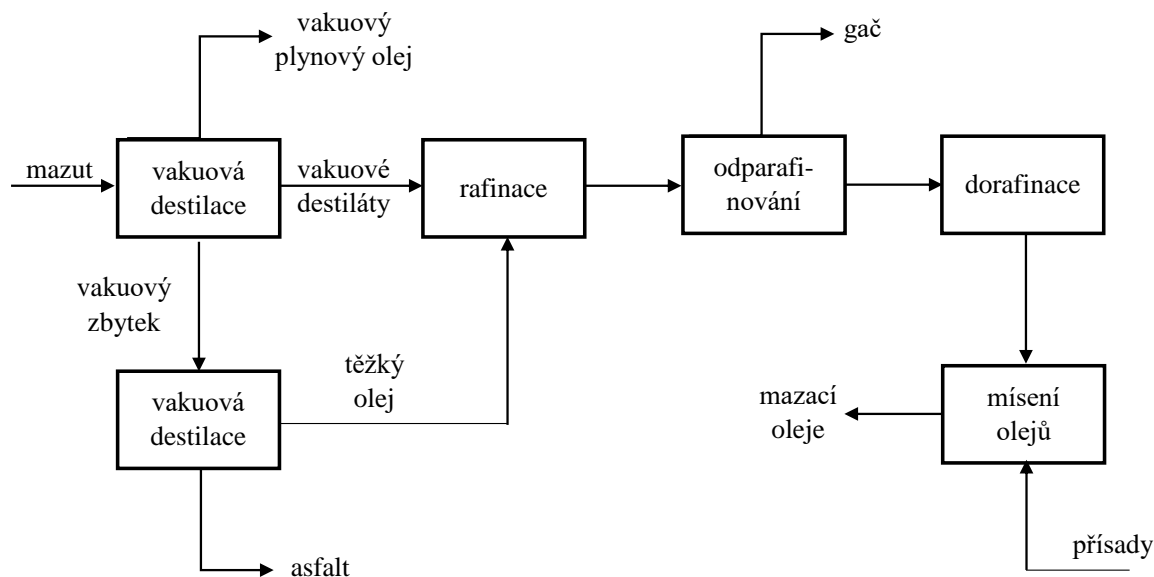
## 1.1 Minerální oleje

Minerální oleje se řadí mezi nejpoužívanější kapalné izolanty [10], v oblasti izolačních i chladících vlastností jsou minerální oleje zcela dostačující. Vlastnosti minerálních olejů se mohou zhoršovat vlivem provozních činitelů (oxidace, pohlcování vody, záření nebo teplota), tato degradace se nazývá stárnutí oleje [1]. V dnešní době je velmi diskutovaná ekologická odbouratelnost a celkově likvidace minerálních olejů, která je finančně i technologicky velmi náročná. Dalším problémem minerálních olejů je snižování množství ropy [3].

Negativní vliv mají minerální oleje i na lidské zdraví. Existují studie prováděné Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny, které shledávají minerální oleje jako karcinogenní [11]. Potenciál minerálních olejů způsobovat rakovinu se však liší se stupněm zpracování. Extrakce olejů pomocí rozpouštědel snižují obsah polyaromatických uhlovodíků a tím i karcinogenitu olejů. Naopak mírně upravené nebo neupravené oleje byly klasifikovány jako karcinogeny skupiny 1 [12]. Pro porovnání Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny do této skupiny klasifikuje látky jako jsou arsen, azbest, polonium nebo

gama záření. Minerální oleje mohou způsobovat rakovinu kůže nebo kostí hlavně při políhání, větší ale méně viditelný problém jsou páry minerálních olejů, které mohou způsobit rakoviny vnitřních orgánů například žaludku, močového měchýře, hrtanu nejčastěji však bývají zasažené plíce. Podobně jako na lidi působí minerální olej i na zvířata, proto je potřeba bránit jeho úniku [12].

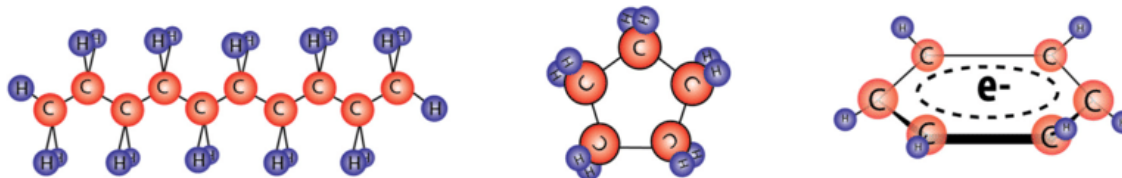
Minerální oleje jsou vyráběny z ropy za pomoci destilace a dalších technologií viz obrázek 1. Odsolená ropa nejdříve projde v destilační koloně při zvýšeném tlaku cca 0,15 MPa atmosférickou destilací, při které se odebírají vodní páry, lehký benzín a petrolej. Následuje vakuová destilace, která probíhá naopak při sníženém tlaku 2 až 10 kPa. Při vakuové destilaci se z mazutu odebírají lehké, střední a těžké oleje. Dalším krokem úpravy je rafinace, při které se ze směsi odstraňují prvky s větším počtem uhlíků, které zhoršují potřebné vlastnosti například viskozitu oleje. Rafinace se provádí extrakcí selektivními rozpouštědly nebo hydrokrakováním. Po rafinaci prochází směs odparafinováním, kdy se z oleje při nízkých teplotách odebírají tuhé uhlovodíky. Pomocí dorafinace se odstraňují zbytky nechtěných látek. Posledním krokem je míšení a aditivace, kdy se do základních olejů přidávají různé složky pro zlepšení parametrů [13].



Obrázek 1 - Schéma výroby minerálních olejů překresleno z [13]

Ropa je převážně složena z uhlovodíků [13], dále obsahuje kovy organických a anorganických solí a sloučeniny kyslíku nebo síry. Ropa je směsí nejen kapalných látek, obsahuje i látky pevné například parafín a plyny jako jsou etan, butan, oxid uhličitý nebo dusík [5]. Podobně jako ropa, minerální oleje obsahují převážně tři typy uhlovodíkových

sloučenin – parafinické, naftenické a aromatické. Složení ropy je závislé na místě těžby a poměry obsahů jednotlivých typů sloučenin určují vlastnosti oleje. Podle převažujících typů uhlovodíkových sloučenin se oleje dělí na parafinické, naftenické a aromatické [4], vazby mezi uhlovodíky jsou zobrazeny na obrázku 2 [14].



Obrázek 2 - Struktury olejů (parafinické, naftenické, aromatické) překresleno z [14]

**Parafinické** oleje se skládají primárně z nasycených uhlovodíků s rozvětvenými (izoalakany, izoparafíny) a nerozvětvenými (n-alkany, parafíny) řetězci. Tyto oleje mají vysoký bod vzplanutí, dobrou viskozitní křivku a také jsou stále chemicky. Nevýhodou je tendence tuhnutí při teplotách blízkých nule [5]. Příkladem parafinického oleje je MOGUL TRAFO CZ A, parametry produktu jsou vypsány v tabulce 1 [6].

Tabulka 1 - Parametry oleje MOGUL TRAFO CZ A převzato z [6]

Parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
Měrná hmotnost při 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	840	ČSN EN ISO 12185
Kinematická viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	10	ČSN EN ISO 3104
Kinematická viskozita při -30 °C	mm <sup>2</sup> /s	850	ČSN EN ISO 3104
Bod vzplanutí	°C	175	ČSN EN ISO 2719
Bod tekutosti	°C	-45	ČSN IS 3016
Číslo kyselosti	mg KOH/g	0,005	ČSN ISO 6618
Přeskokové napětí na 2,5 mm	kV	75	ČSN EN 60156
Ztrátový činitel tg δ při 90 °C	-	0,001	ČSN EN 60247
Rezistivita	Ω·cm·10 <sup>12</sup>	1 000	IEC 247
Obsah inhibitoru	% hm.	0,40	-

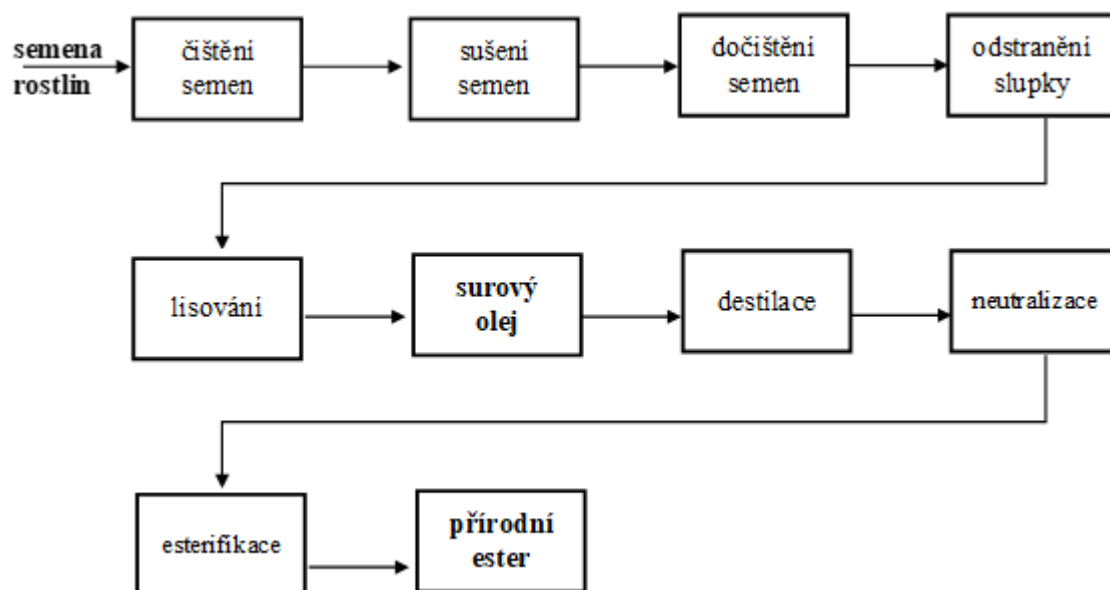
**Naftenické** oleje mají oproti parafinickým olejům nižší bod tekutosti, ale jsou méně stálé. Jsou složené z nasycených cyklických uhlovodíků s obecným vzorcem C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> [5]. Zástupcem naftenických olejů jsou například oleje Lyra X, Nytro 4000 X a Nyswitcho 3X od firmy Nynas [15].

## 1.2 Rostlinné oleje

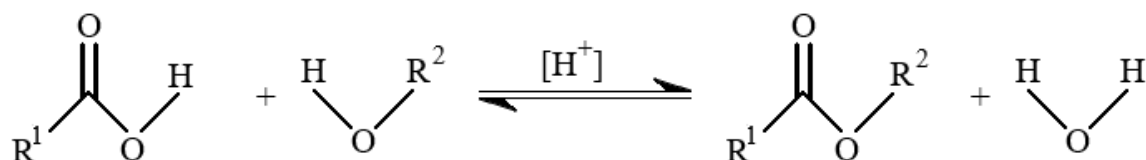
Rostlinné oleje se získávají lisováním semen rostlin jako jsou řepka, sója, slunečnice, olivy, mák, len, skočce (ricinový olej) apod. Tyto oleje jsou široce využívané, nejčastěji se s nimi setkáváme v potravinovém průmyslu, využití mají ale i jinde, například v barvách, kosmetice, léčivech, elektrotechnice a v neposlední řadě jako složky biopaliv [16]. V elektrotechnice nejsou rozšířené tak jako oleje minerální. Avšak potenciál olejů rostlinného původu není zanedbatelný. Rostlinné oleje jsou především netoxické a dobře rozložitelné v přírodě, rozložitelnost se měří dle normy OECD 301 a je podrobněji zmíněna v kapitole 2.11. Oproti minerálním olejům lze primární zdroj vypěstovat téměř na celém světě [17]. Rostlinné oleje mají také vyšší bod vzplanutí a hoření než minerální oleje a srovnatelné elektroizolační vlastnosti. V porovnání s minerálními oleji mají nižší oxidační stabilitu, vysokou absorpci vody při nízkých teplotách a také vyšší cenu [18].

Výroba rostlinného oleje je zobrazena na obrázku 3 začíná sklízením, očištěním a sušením semen. Dále se semena dočistí pomocí sít, magnetů a aspirátorů. Následně se ze semen odstraní slupka, a to buď chemicky nebo mechanicky. Dalším krokem je rozdrcení semen a lisování oleje. Lisování může být vysokotlaké nebo nízkotlaké a za studena či za tepla, záleží na druhu rostlin a požadovaných vlastnostech oleje. Vylisovaný olej má velký obsah nerozpustných i rozpustných nečistot. Tyto nečistoty zhoršují vlastnosti oleje, a proto se odstraňují destilací, kdy se odpařují páry rozpustných nečistot. Dále se olej čistí neutralizací, při které se do oleje vmíchá hydroxid sodný (NaOH), výsledkem neutralizace je vznik pevné vrstvy, která se odstraní odstředěním. Třetí možností, jak z oleje nečistoty odstranit je esterifikace, která probíhá ve vakuu za vysokých teplot, kdy se pomocí metylalkoholu v oleji vyvolá reakce, při které vznikne glycerol, který se z oleje odstraní. Oleje zbavené glycerolu se nazývají přírodní estery [16], [19]. Při esterifikaci dochází k nahrazení OH skupin karboxylových kyselin organickým zbytkem alkoholu (R), který vzniká při odštěpení vodíku z OH skupiny. Výsledkem esterifikace je vznik esteru a vody, chemická reakce je popsána na obrázku 4 [20].





Obrázek 3 - Schéma výroby rostlinného oleje překresleno z [21]



Obrázek 4 - Chemická rovnice esterifikace překresleno z [20]

Rostlinné oleje jsou směsí glycerinů esterů, nasycených a nenasyčených mastných kyselin. Právě poměr nasycených a nenasyčených mastných kyselin je hlavním faktorem určujícím vlastnosti oleje. Hlavní vlastností určující se u rostlinných olejů je stupeň polymerizace, která je důsledkem reakce nenasyčených mastných kyselin s kyslíkem. Dle stupně polymerizace se oleje dělí na nevysychavé (olivový, ricinové), vysychavé slabě (řepkové), polovysychavé (slunečnicové) a vysychavé (konopné a ořechové) [19].

S ohledem na vlastnosti rostlinných olejů se v elektrotechnice používají spíše pro nízkonapěťová zařízení [5]. **Vysychavé** oleje se používají jako přísady do elektroizolačních laků [1]. **Nevysychavé oleje** se používají jako náplň kondenzátorů pro stejnosměrné obvody [1] nebo jako izolace kabelů [22]. Rostlinné oleje se používají i jako elektroizolační média do transformátorů, ve světě jsou již transformátory plněné oleji FR3 fluid od firmy Cargill nebo BIOTEMP od firmy ABB, vlastnosti těchto rostlinných olejů jsou popsány v tabulce 2. Jejich použití je popsáno v kapitole 1.4.

Tabulka 2 - Vlastnosti rostlinných olejů převzato z [7], [8]

Parametr	Jednotka	Hodnota		Norma
		FR3	BIOTEMP	
Přeskokové napětí na 2,5 mm	kV	75	76	IEC 60156
Ztrátový činitel tg δ při 90 °C	-	0,02	0,02	IEC 60247
Relativní permitivita při 20 °C	-	3,1	3,2	IEC 60247
Rezistivita	$\Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{12}$	-	1 000	IEC 247
Kinematická viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	32 až 34	45	ČSN EN ISO 3104
Bod vzplanutí	°C	255	330	ČSN EN ISO 2719
Bod tekutosti	°C	-18 až -23	-15 až -25	ČSN IS 3016
Číslo kyselosti	mg KOH/g	0,042	0,075	ČSN ISO 6618

### 1.3 Syntetické oleje

Syntetické oleje jejichž vývoj nejvíce rostl v první polovině 20. století [3], měly být náhradou minerálních olejů. Důvodem vývoje syntetických olejů byly hlavně zvyšující se požadavky na ekologickou nezávadnost [1].

První generací syntetických kapalin byly polychlorované bifenyly (PCB), tyto kapaliny měly dostačující vlastnosti a byly používány v malých transformátorech nebo kondenzátorech. V 70. letech minulého století byly pro svou toxicitu zakázány [23].

U dalších generací syntetických kapalin bylo dosaženo ekologické odbouratelnosti. Zároveň mají tyto syntetické oleje srovnatelné elektroizolační vlastnosti jako minerální a rostlinné oleje, k tomu mají navíc velmi vysoké body vzplanutí i hoření. Největším problémem syntetických kapalin ve srovnání s minerálními oleji je jejich vysoká cena [24].

Syntetické oleje jsou vyráběny syntézou jiných látek než je ropa [19]. Právě způsob výroby má zásadní vliv na vlastnosti kapalin, které mohou být velmi podobné ale i velmi odlišné [3]. Dle způsobu výroby lze syntetické oleje rozdělit do různých skupin [5].

**Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků**, jsou látky nepolární, stále na vzduchu, odolné proti záření a ekologicky nezávadné [1]. Mají dobré elektroizolační vlastnosti i při vyšších teplotách a používají se nejčastěji jako oleje do kabelů nebo k impregnaci svitkových kondenzátorů [5].

**Chlorované uhlovodíky** jsou deriváty benzenu a bifenyly, vlastnosti těchto kapalin se mění se stupněm chlorování. Typickým zástupcem je Delor [1], který je stejně jako ostatní chlorované uhlovodíky pro svou toxicitu zakázán [24].

**Fluorované sloučeniny** jsou až do 500 °C chemicky velmi stálé, problémem je jejich snadné vypařování a při přítomnosti vlhkosti jsou silně korozivní k železu a hliníku. Tyto

sloučeniny mají výborné elektroizolační vlastnosti, kterých se využívá v transformátorech [5]. Fluorované sloučeniny se také používají ve výkonových spínačích, kde se využívá jejich zhašecích účinků [1].

**Aromatické uhlovodíky** vlastnosti těchto kapalin závisí na oblasti využití, pokud je potřeba, lze vytvořit aromatické uhlovodíky s nižší nebo vyšší viskozitou. Tyto kapaliny jsou velmi stabilní proti částečným výbojům, nejčastěji se používají jako náplně do kabelů a kondenzátorů [3].

**Syntetické estery** jsou velmi podobné rostlinným olejům. Mají oproti nim kratší řetězce molekul mastných kyselin a to má vliv hlavně na nižší úroveň viskozity a tím lepší chladicí využití [3]. To neplatí v porovnání s minerálními oleji, u kterých je viskozita ještě nižší než u syntetických esterů. Syntetické estery se využívají hlavně jako náplň vysokofrekvenčních kondenzátorů, které mají s tímto izolantem malé dielektrické ztráty. V dnešní době jsou syntetickými estery plněny i transformátory [5].

**Silikonové kapaliny** jsou polymery na bázi křemíku a kyslíku, které spolu mohou tvořit dlouhé řetězce. Silikonové kapaliny mají dobré elektroizolační vlastnosti [24], některé i lepší než minerální oleje [3] a jsou chemicky stálé, dále jsou schopné pracovat ve velkém rozsahu teplot [24].

Nejnámějším zástupcem syntetických olejů je **Midel 7131**, tento olej spadá do kategorie organických esterů. V praxi se využívá už více než 30 let, a to hlavně jako elektroizolační kapalina pro transformátory. Midel 7131 přesně vystihuje výše popsané vlastnosti syntetických olejů. Vyniká svou biodegradabilitou, kdy se rozloží až 89 % objemu do 28 dní [3], dále je netoxický a má vysoký bod vzplanutí a hoření 260 °C a 316 °C, pro porovnání bod vzplanutí minerálního oleje MOGUL TRAF0 CZ A je pouze 175 °C. Parametry oleje Midel 7132 jsou popsány v tabulce 3.

Tabulka 3 - Parametry oleje MIDE1 7131 převzato z [9]

Parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
Kinematická viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	29	ČSN EN ISO 3104
Kinematická viskozita při -20 °C	mm <sup>2</sup> /s	1440	ČSN EN ISO 3104
Bod vzplanutí	°C	260	ČSN EN ISO 2719
Bod tekutosti	°C	316	ČSN IS 3016
Číslo kyselosti	mg KOH/g	0,02	ČSN ISO 6618
Přeskokové napětí na 2,5 mm	kV	75	ČSN EN 60156
Ztrátový činitel tg δ při 90 °C	-	< 0,008	ČSN EN 60247
Rezistivita při 90 °C	GΩ·m	20	IEC 60247

## 1.4 Využití elektroizolačních kapalin v budoucnosti

V dnešní době jsou nejrozšířenější olejové transformátory plněné minerálními oleji. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1 hlavní nevýhodou je ekologická odbouratelnost minerálních olejů, a právě ekologie a závislost na nerostném bohatství hýbe průmyslem na celém světě. Roste podíl obnovitelných zdrojů energie, zavírají se uhelné elektrárny. Podobný trend lze předpokládat i u výroby olejových transformátorů. Lze předpokládat nárůst transformátorů s oleji, které lze ekologicky nejen odbourat ale i vyrobit například z lokálních surovin.

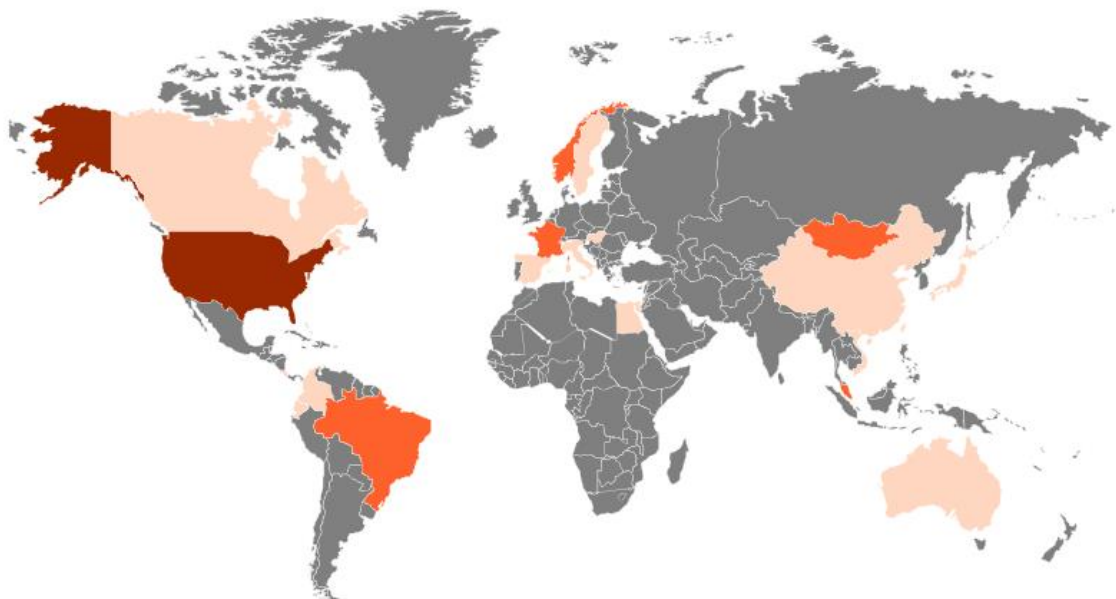
Rostlinné i syntetické oleje dosahují parametrů požadovaných pro provoz výkonových či distribučních transformátorů. Jeden z problémů, který brzdí rozvoj transformátorů plněných rostlinnými či syntetickými oleji, je absence norem popisujících provozování těchto transformátorů. Druhým zásadním problémem je cena alternativních olejů. Při porovnání cen, například internetový obchod [www.edenoil.co.uk](http://www.edenoil.co.uk) nabízející transformátorové oleje prodává rostlinný olej MIDEL eN 1204 za trojnásobnou cenu než minerální, v případě silikonového oleje MIDEL 7131 je cena téměř čtyřnásobná. Ceny olejů jsou porovnány v tabulce 4. Uváděné ceny jsou bez daně, přepočten byl při kurzu 1 £ = 30,11 Kč.

Tabulka 4 - Porovnání cen olejů

Druh oleje	Cena za 205 litrů	Cena v Kč za litr
EDEN mineral oil	300 £	44,06 Kč
Midel eN 1204	853 £	125,29 Kč
Midel 7131	1 100 £	161,56 Kč

I přes výše uvedené problémy se stále častěji instalují transformátory plněné syntetickými či rostlinnými oleji. Syntetickým olejem MIDEL 7131 od firmy M&I Materials je již plněn výkonový transformátor v Londýně, nebo výkonový transformátor o výkonu 135 MVA připojující k síti vodní elektrárnu na severu Švédska. Distribuční transformátory plněné MIDELEM 7131 lze najít v Mexico City, na letišti Heathrow v Londýně nebo na zaoceánské lodi firmy Holland America Line. V Německu instalovala v roce 2014 společnost Siemens 420 kV transformátor plněný rostlinným olejem FR3 [25]. Na obrázku 5 je zobrazena mapa, na které jsou vyznačena místa, kde je použit rostlinný olej BIOTEMP od společnosti ABB. Společnost uvádí, že olejem BIOTEMP bylo naplněno více než 3 500 transformátorů. Transformátory s olejem BIOTEMP byly úspěšně nainstalovány v Severní i Jižní Americe, Západní a Severní Evropě, Číně, Austrálii nebo Singapuru ve kterém je nainstalováno například 16 transformátorů ve Woodland Data Center či

8 transformátorů ve Farrer Mediplex Hospital. Z obrázku je vidět, že rostlinný olej není příliš rozšířený ve východní části Evropy a Africe [26].



Obrázek 5 - Mapa rozšíření transformátorů plněných rostlinným olejem BIOTEMP převzato z [26]

Lze tedy předpokládat pokles podílu transformátorů s minerálním olejem, a to hlavně u nových transformátorů a transformátorů, které budou instalovány poblíž přírodních zdrojů a lidských obydlí.

## 2 Vybrané vlastnosti elektroizolačních kapalin

V této kapitole jsou popsány elektrické i neelektrické vlastnosti elektroizolačních kapalin. Jedná se pouze o vybrané vlastnosti, vlastnosti byly voleny s ohledem na produktové listy jednotlivých elektroizolačních kapalin různých výrobců. Z produktových listů byly vybrány a v následující kapitole jsou popsány ty nejčastěji zmiňované vlastnosti.

### 2.1 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita  $\rho_v$  [ $\Omega \cdot m$ ] je převrácená hodnota elektrické vodivosti [27]. Kapaliny vedou elektrický proud pomocí volných nosičů náboje, tento typ vodivosti se nazývá iontová vodivost, ta může být vlastní a nevlastní [1]. Elektroizolační kapaliny jsou nepolární látky, u tohoto typu kapalin se objevuje převážně nevlastní vodivost, vedení proudu tedy způsobují nečistoty a přítomnost vody v kapalině, dále je nevlastní vodivost závislá na teplotě a velikosti měřicího napětí [28].

Vnitřní elektrický odpor se určí z proudu protékajícího vzorkem. Pro každý druh elektroizolační kapaliny by mělo být stanoveno zkušební napětí, pokud není, měří se vnitřní rezistivita při intenzitě elektrického pole  $0,25 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Hodnota naměřeného vnitřního odporu se odečítá po jedné minutě. Vnitřní rezistivita se vypočte z následujícího vztahu [28].

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \quad (1)$$

kde  $C_0$  je kapacita prázdné měřicí nádoby [F],

$R_v$  je naměřená hodnota vnitřního elektrického odporu [ $\Omega$ ],

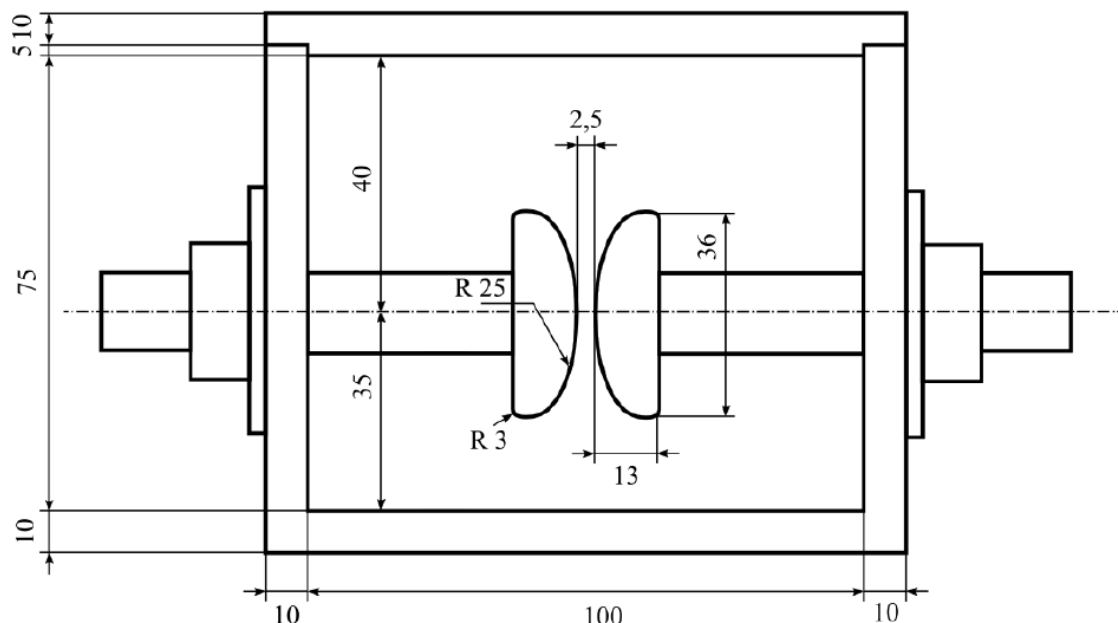
$\varepsilon_0$  je permitivita vakua  $8,8 \cdot 10^{-12} \text{ [F} \cdot \text{m}^{-1}]$ .

### 2.2 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost  $E_p$  [ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ] je poměr mezi přeskokovým (u pevných látek průrazným) napětím a vzdáleností zkušebních elektrod [29]. Norma ČSN EN 60156 – Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda, která popisuje metodu pro měření elektrické pevnosti udává vzdálenosti zkušebních elektrod 2,5 mm [30]. Přeskokové napětí  $U_p$  je napětí, při kterém mezi zkušebními elektrodami vznikne první výboj [27]. Tento parametr patří mezi nejdůležitější informace o kapalině, a proto mezi nejčastěji měřené parametry elektroizolačních kapalin [31].

Hodnota elektrické pevnosti je značně závislá na obsahu vody, plynů a dalších nečistot v elektroizolační kapalině. Z hodnoty elektrické pevnosti lze zjistit, jak moc je elektroizolační kapalina znečištěna [31].

Elektrody pro měření přeskokového napětí se vyrábějí z mědi, nerezové oceli nebo mosazi. Elektrody jsou semisférického tvaru a jsou od sebe vzdáleny 2,5 mm ( $\pm 0,05$  mm), schéma elektrod je zobrazeno na obrázku 6. Objem zkušební nádoby je mezi 350 ml až 600 ml, elektroizolační kapalina se do nádoby nalévá po její stěně, tak aby nevznikaly vzduchové bubliny, které se případně dají rozmíchat čistou skleněnou tyčinkou [28].



Obrázek 6 - Elektrody pro měření přeskokového napětí převzato z [32]

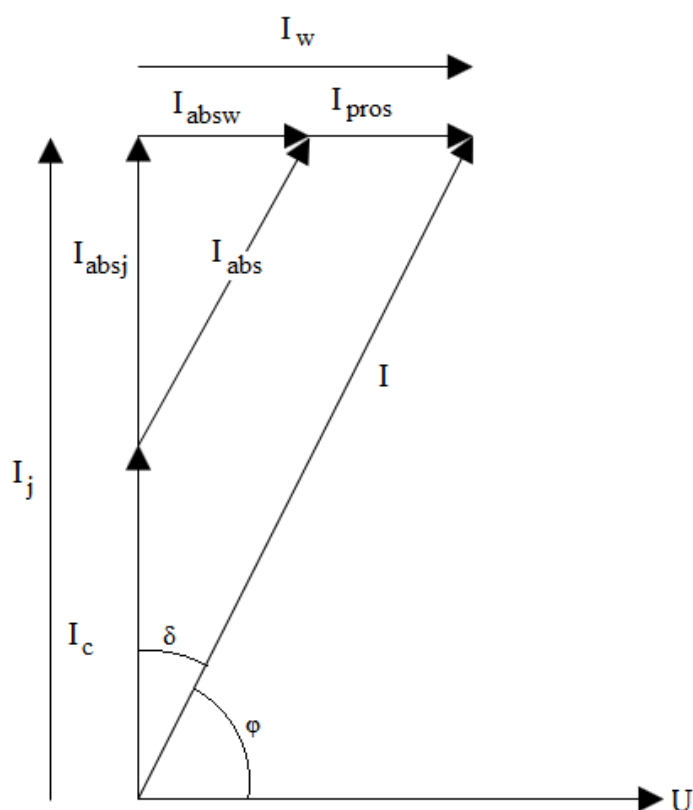
Měření elektrické pevnosti musí proběhnout až po deseti minutách od naplnění nádoby, střídavé napětí se plynule zvětšuje až do přeskoku [29]. Měří se šest hodnot přeskokového napětí, mezi kterými jsou pětiminutové intervaly. Z naměřených hodnot se pak vypočte střední hodnota přeskokového napětí a směrodatná odchylka měření [27].

## 2.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  popisuje dielektrické ztráty [28]. Při vložení izolantu do elektrického pole dochází k pohybu volných i vázaných nábojů, při tomto pohybu náboj naráží do okolních částic a vzniká tak tepelná energie. Tato energie je nazývána dielektrickými ztrátami [1] a je až na výjimky (kdy se využívá pro dielektrický ohřev) nežádoucí [27]. Ztrátový činitel je ukazatelem přítomnosti polárních a iontových složek v kapalině. Při dlouhodobém sledování lze ze ztrátového činitele vyčíst tendence ohřevu oleje a případný přeskok [28]. Způsob měření ztrátového činitele je popsán v normě ČSN EN 60247 – Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ( $\text{tg } \delta$ ) a rezistivity při stejnosměrném napětí [33].

V případě čistých izolačních kapalin ztrátový činitel roste s druhou derivací růstu teploty, naopak s rostoucí frekvencí ztrátový činitel klesá. Dielektrické ztráty jsou v tomto případě dány pouze vodivostí dielektrika a jsou v porovnání s nečistými izolanty minimální. V případě izolačních obsahujících nečistoty, iontové nebo polární složky se k vodivostním ztrátám přidávají i ztráty polarizační. Podobně jako u čistých izolačních dielektrické ztráty s teplotou rostou a s frekvencí klesají, v tomto případě mají však ztráty vlivem polarizace lokální maxima [28].

Děje v dielektriku vloženého do elektrického pole lze popsat pomocí vektorového diagramu, který je zobrazen na obrázku 7. Tento diagram zahrnuje všechny složky ovlivňující dielektrikum [29]. Kde  $U$  je napětí přiložené na izolační,  $I_c$  je proudová složka, která vznikla rychlými bezztrátovými polarizacemi.  $I_{abs}$  je proud absorpční vyvolaný pomalými polarizacemi, tento proud není kolmý k napětí a lze jej rozložit na reálnou a imaginární složku, imaginární složka společně s  $I_{pros}$  vodivostním (prosakovým) proudem izolantu pak určuje úhel mezi napětím  $U$  a proudem protékajícím izolantem  $I$  a tím i velikost úhlu  $\delta$  [1][29].



Obrázek 7 - Vektorový diagram dielektrika překresleno z [1]



## 2.4 Relativní permitivita

Relativní permitivita izolantů je definována poměrem kapacit kondenzátoru s daným dielektrikem a totožného kondenzátoru s vakuem [1] viz rovnice 2. Je to parametr, který popisuje namáhání izolace v elektrickém poli. U kapalných izolantů nabývá nejčastěji hodnot 2 až 3. U kapalných izolantů je relativní permitivita přímo závislá na jejich polarizaci, a naopak má klesající tendenci s rostoucí teplotou kapaliny, ovšem s provozním stárnutím kapaliny permitivita roste [28].

Relativní permitivita charakterizuje schopnost polarizace kapalin [1], která roste s provozním stárnutím, proto je relativní permitivita parametr, který se používá pro posouzení čistoty elektroizolačních kapalin. Měření relativní permitivity probíhá společně s měřením ztrátového činitele, většinou pomocí automatického měřicího můstku [28].

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (2)$$

kde  $C_0$  je kapacita kondenzátoru s vakuem [F],

$C_x$  je kapacita kondenzátoru s daným dielektrikem [F].

## 2.5 Barva

Barva je první zkoumaný parametr oleje při odběru vzorku, na základě barvy oleje je možné odhadnout jeho stav [28]. Obecně platí, že čím světlejší olej je, tím je kvalitnější [34]. Pokud je známá výchozí barva izolantu, lze z její změny přibližně sledovat jak olej stárne, stárnutí oleje se vyznačuje tmavnutím barvy [28]. Odebraný vzorek se porovnává s barvenými standardy a výsledek se nejčastěji označuje číslem viz tabulka 5, lze ho ale popsat písmenem nebo písmenem a číslem [28]. Pracovníci Université du Québec à Chicoutimi v Kanadě tepelně stárnuli minerální izolační olej a změnu barvy zaznamenávali, jak se barva mění je vidět v tabulce 5 [34].

Tabulka 5 - Změna barvy při stárnutí minerálního oleje převzato z [34]

Porovnávací číslo barvy	Barva	Stav oleje
<7	Světle žlutá	Skvělý stav
7 – 10	Žlutá	Odstátý olej
10 – 11	Tmavě žlutá	Stárnutý olej
11 – 14	Jantarová	Mezní stav
14 – 15	Hnědá	Špatný stav
16 – 18	Tmavě hnědá	Velmi špatný stav (Recyklovaný olej)
>18	Černá	Odpadní olej

Pro stanovení barvy lze použít dva způsoby. **Subjektivní**, kde je barva izolantu porovnávána s barvenými etalony. Při této metodě je důležité porovnávat oleje o stejné tloušťce vrstvy a ideálně při nepřímém denním světle. U druhé metody se používají měřicí přístroje, tato metoda se nazývá **objektivní**. Při objektivním měření se v kolorimetru porovnává schopnost vzorku absorbovat světlo s absorpcí světla rozpouštědla [28].

## 2.6 Bod tekutosti

Bod tekutosti, dříve nazýván jako bod tuhnutí je teplota, při které se kapalná látka mění na látku tuhou. Vzhledem k tomu, že se transformátory používají i v oblastech s velmi nízkou teplotou, je bod tekutosti podstatný parametr izolačních olejů.

Při měření bodu tekutosti je potřeba nejdříve zahřívát vzorek oleje 15 minut na 50 °C. Po zahřátí se olej nalije do zkumavky s rovným dnem, do které se zároveň vloží teploměr. Zkumavka s olejem se vloží do vody o teplotě 25 °C, při poklesu teploty oleje na 32 °C se zkumavka nakloní a v případě, že olej neteče lze říci, že olej tuhne při teplotě nad +30 °C. Pokud vzorek teče, vkládá se zkumavka do vodní lázně, která je o 5 až 6 °C chladnější než vzorek oleje. Olej se kontroluje nakloněním pokaždé, když teplota klesne o 2 °C, v případě, že se vzorek 5 sekund nepohne, označí se aktuální teplota v celých stupních jako bod tekutosti [28].

## 2.7 Bod vzplanutí a bod hoření

Hořlavost kapaliny je popsána pomocí bodu vzplanutí, který je definován nejnižší teplotou, při které se směs par vzorku vznítí a okamžitě zhasne a bodu hoření, který odpovídá teplotě, kdy páry vzniklé z oleje po zapálení samostatně hoří [32].

Pro měření teploty bodu vzplanutí se používá Pensky – Martensův přístroj, do kterého se vloží 60 ml oleje, ve kterém je vzorek oleje zahříván. K zahřátému oleji se v určitých intervalech přikládá rozžhavené tělísko, v případě vzplanutí se zaznamená teplota bodu vzplanutí [17].

## 2.8 Viskozita

V kapalině je vnitřní tření, toto tření je popisováno pomocí viskozity, což je jedna ze základních vlastností kapalin [35]. Velikost vnitřního tření je závislá převážně na přitažlivých silách mezi částicemi kapaliny. Čím větší síla mezi částicemi je, tím větší je viskozita kapaliny, vyšší viskozita v praxi znamená pomalejší pohyb těles ponořených do kapaliny nebo pomalejší pohyb samotné kapaliny [28]. Viskozita je závislá na teplotě a tlaku [35] a její hodnota je důležitá hlavně z pohledu chladicí funkce oleje [28].

Rozlišují se dva druhy viskozity, **viskozita dynamická**  $\eta$ , ta má základní jednotku Pa·s. Dynamická viskozita je tečná síla potřebná k posunutí jedné vrstvy o ploše 1 m<sup>2</sup> ve vodorovné rovině o 1 m po stejné vrstvě ve vzdálenosti 1 m [28]. Dynamickou viskozitu lze vypočítat pomocí rovnice [28]:

$$\eta = \nu \cdot \rho \cdot 10^3 \quad (3)$$

kde  $\rho$  je hustota vzorku kapaliny při teplotě určování viskozity [g·cm<sup>-2</sup>],

$\nu$  je kinematická viskozita kapaliny [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>].

Jak je vidět z rovnice 3, pro výpočet dynamické viskozity je potřeba znát **kinematickou viskozitu** kapaliny, která se měří pomocí viskozimetru. Měří se doba průtoku určitého objemu kapaliny, při měření kinematické viskozity je důležitá gravitační síla, která působí na kapalinu a teplota při které je měření prováděno [28], tato teplota je stanovena v normě ČSN EN ISO 3104, kinematická viskozita bývá často měřena pro teplotu 40 °C [36]. Základní jednotkou kinematické viskozity je m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>, v praxi lze vidět i jednotku 1 stokes, který odpovídá 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> [35]. Kinematickou viskozitu lze vypočítat z konstanty viskozimetru a času průtoku kapaliny viz rovnice 4 [28].

$$\nu = C \cdot t \quad (4)$$

kde  $C$  je konstanta viskozimetru [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>],

$t$  je střední hodnota doby průtoku viskozimetru [s].

## 2.9 Obsah vody

Množství vody v oleji je popisováno v ppm (parts-per-million), což je poměrná část hmotnosti vody v oleji a hmotnosti oleje [37]. Přítomnost vody v oleji velmi výrazně zhoršuje elektrické vlastnosti oleje, především elektrickou pevnost [28] a zvyšuje možnost zažehnutí oleje [37]. Voda v oleji také zrychluje stárnutí papírové izolace v elektroizolačním systému olej-papír [37]. Voda může být v oleji rozpuštěna, či ve formě malých kapiček (emulze) nebo volně většinou na spodní části nádoby s olejem [28], [37]. U minerálních olejů je obecně za maximální hodnotu vody považováno 35 ppm [37].

Obsah vody v oleji se měří pomocí coulometrické titrační metody, v této metodě se využívá reakce vody a jódu. Do oleje se vmíchá alkoholový roztok jodidového iontu a oxidu siřičitého. Ve směsi vzniká jód, který reaguje s vodou a vytváří elektrický proud, jehož velikost je úměrná množství vody v oleji [28].

## 2.10 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti popisuje množství hydroxidu draselného (KOH) potřebné k neutralizaci organických a anorganických kyselin na 1 gram oleje [28], [34], [37]. Množství se popisuje v miligramech hydroxidu draselného na gram oleje (mg KOH / g) [34]. V případě nových olejů, popisuje číslo kyselosti kvalitu a stupeň rafinace olejů, jelikož při nedokonalém provedení rafinací zůstávají v oleji zbytky kyselin [28].

Přítomnost kyselin v oleji má za následek zrychlené stárnutí a přehřívání elektroizolačního systému olej – papír. Zejména organické kyseliny s ostatními materiály v transformátoru vytvářejí kal, který se usazuje na povrchu transformátorové lepenky a snižuje možnost chlazení transformátoru [34], [37].

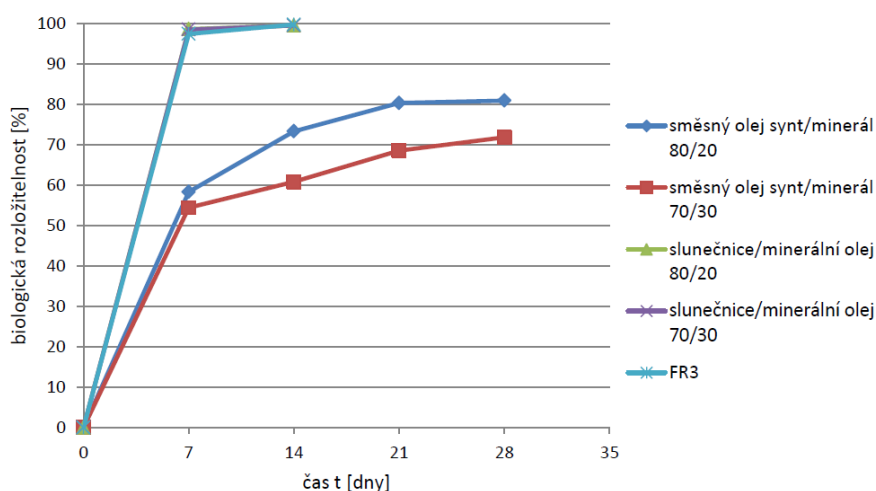
Pro stanovení čísla kyselosti lze použít potenciometrickou metodu. Výsledkem této metody je množství hydroxidu draselného potřebné pro neutralizaci zkoušeného vzorku na hodnotu pH 11,5. Potenciometrické stanovení kyselosti se provádí na elektronickém automatickém pH titrátoru s kombinovanou elektrodou [28].

## 2.11 Vliv na životní prostředí

Pro zohledňování vlivu na životní prostředí jsou uvažovány dvě hlavní kritéria, biologická odbouratelnost a toxicita [38]. Za biologicky odbouratelné se považují látky, které se za pomoci biologických činitelů rozloží na surové přírodní složky, jako jsou oxid uhličitý, voda a minerály, které se běžně vyskytují v přírodě [32]. Kritickým parametrem biologické odbouratelnosti je množství odbouraného materiálu za 28 dní. Dle normy

OECD 301 se za snadno biologicky odbouratelné materiály považují materiály, ze kterých se za 28 dní rozloží na surové přírodní složky alespoň 60 % látek [39].

Testy provedené metodou dle normy OECD 301 popisují velmi špatnou rozložitelnost minerálních olejů. Biologická odbouratelnost minerálních olejů se pohybuje mezi 15 a 35 % [40]. Rostlinné oleje naopak mají velmi dobrou vlastnost biologické odbouratelnosti. Výsledky testů provedených pro Katedru technologií a měření FEL ZČU vykazují biologickou rozložitelnost všech testovaných olejů minimálně 80 %. Velmi dobré biologické rozložitelnosti dosáhla i směs syntetického oleje s minerálním, výsledky testů jsou na obrázku 8 [3].



Obrázek 8 - Biologická rozložitelnost olejů převzato z [3]

### 3 Degradční procesy v EIS olej – papír

V elektroizolačním systému olej – papír dochází k řadě chemických reakcí, které vedou ke zhoršení elektrických i neelektrických vlastností a mohou vést i k snížení životnosti zařízení ve kterém je systém použit. V této kapitole jsou popsány jednotlivé chemické reakce v elektroizolačním systému olej – papír. Faktory, které mohou být katalyzátory reakcí a výsledné produkty jednotlivých chemických pochodů.

#### 3.1 Degradční procesy v celulóзовém papíru

Degradace celulóзовého papíru je proces, při kterém dochází k postupnému zkracování celulóзовých vláken. Degradční procesy v celulóзовém papíře mohou být fyzikálního i chemického charakteru. Hlavními degradačními procesy papíru jsou **hydrolyza, oxidace, fotooxidace, fotolýza a síťování** [41].

Papír vzniká průmyslovým zpracováním dřevoviny či buničiny. Dřevovina je vláknina vyrobená z dřevěných polen, která jsou za mokra broušena brusnými kameny, oproti tomu buničina je vláknina vyrobená chemickou cestou ze dřeva, ale i lnu nebo bavlny. Papír se skládá z celulózy, hemicelulózy, ligninu a doprovodných látek jako jsou tuky, vosky či popel. Poměr složek v papíru se odvíjí od primární suroviny, tedy druhu dřeva nebo rostliny, zastoupení jednotlivých složek v různých surovinách je v tabulce 6. Nejvyšší kvalitu papíry se vyrábí z buničiny tak, aby měly co nejvyšší podíl celulózy, proto se nazývají celulóзовé papíry, tyto papíry dosahují až 96 % obsahu celulózy. Mezi celulóзовé papíry patří i transformátorová lepenka, což je celulóзовý papír vytvořený z několika vrstev [41], [42].

Tabulka 6 - Chemické složení dřeva a bavlny [42]

Složky papíru	Dřevo		Bavlna
	jehličnaté	listnaté	
Celulóza [%]	43	43	93–96
Hemicelulóza [%]	~28	~28	1–2
Lignin [%]	23–33	16–25	0
Doprovodné látky [%]	5–9	2–5	3–5

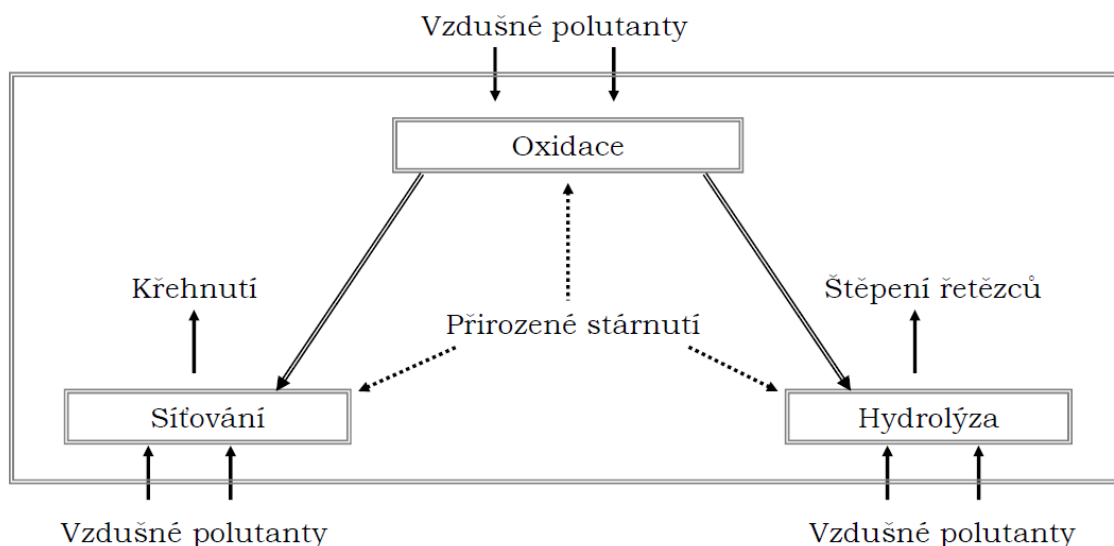
Degradaci papíru způsobují vnější a vnitřní faktory. Za **vnitřní faktory** se považují vlastnosti papíru, které jsou dány surovinami použitými při výrobě papíru a technologiemi jejich zpracování. Tyto faktory nelze po vyrobení papíru ovlivnit. Příkladem vnitřních faktorů jsou výše zmíněná kvalita papíroviny a její chemické složení (výchozí surovina),

použitá plniva, klíždla a barviva, která jsou například u transformátorové lepenky nežádoucí a v neposlední řadě nečistoty při procesu výroby (technologie výroby, technologická voda). **Vnějšími faktory** jsou teplota a relativní vlhkost, atmosféra ve, které je papír uložen, sluneční záření a v neposlední řadě biologičtí škůdci jako hmyz, plísně či bakterie. Tyto faktory lze ovlivnit. Chemické reakce celulózy způsobené vnějšími faktory jsou sepsány v tabulce 7 [41], [42].

Tabulka 7 - Přehled možných typů reakcí vedoucích k degradaci celulózy [42]

Typ chemické reakce	Reagující látky	Produkty
Termická hydrolyza	celulóza + H <sub>2</sub> O	D-glukóza
Hydrolyza v kyselém prostředí	celulóza + H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	D-glukóza
Hydrolyza v alkalickém prostředí	celulóza + báze	nízkomolekul. produkty
Enzymatická hydrolyza	celulóza + celulóza	nízkomolekul. produkty
Oxidace	celulóza + O <sub>2</sub> (T, hv)	částečně oxidovaná a depolymerovaná celulóza

Degradace papíru je proces vznikající z jednotlivých chemických reakcí. Tyto reakce jsou vyvolané vnitřními i vnějšími faktory a navzájem se stimulují. Na obrázku 9 je zobrazeno schéma zjednodušeně popisující degradační mechanismy papíru [42].

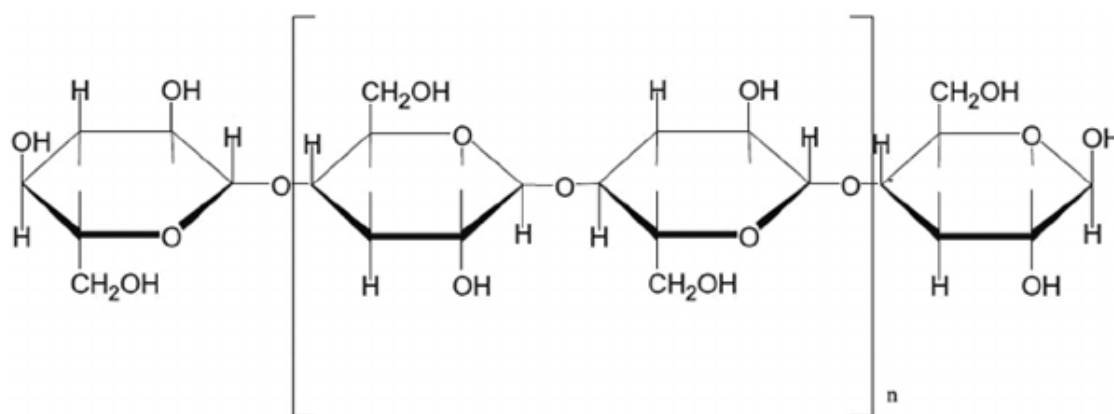


Obrázek 9 - Schéma degradačních procesů papíru [42].

Pro pochopení degradačních procesů je potřeba znát chemické složení celulózy. Základní jednotkou celulózy je  **$\beta$ -D-glukopyranóza**, která dává celulóзовému papíru pevnost a vláknitý charakter. Název této jednotky popisuje její složení a konfigurace.

- Gluko = cukr D-glukóza,
- pyranóza = šestičlenný kruh,
- $\beta$  = konfigurace uhlíkového atomu  $C_1$  ( $C_1$  je první atom uhlíku za atomem kyslíku),
- D = konfigurace na nejvzdálenějším atomu od uhlíku  $C_1$ .

Mezi dvěma  $\beta$ -D-glukopyranózami nastává **glykosidická vazba** a po jejich spojení vzniká celobióza disacharid, který je vyšší stavební jednotkou celulózy, dalším navazováním  $\beta$ -D-glukopyranóz se vytváří makromolekula celulózy [41][42] viz obrázek 10.

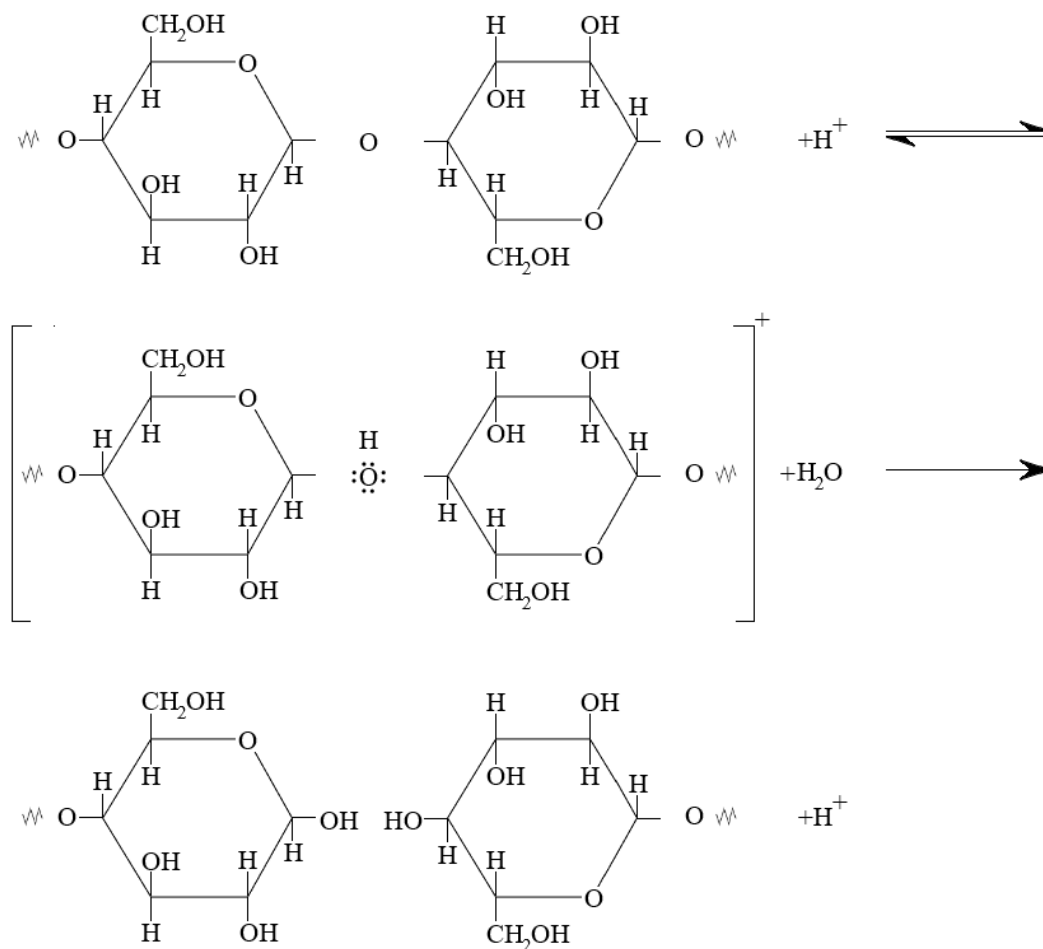


Obrázek 10 - Struktura celulózy překresleno z [42]

**Hydrolyza celulózy** je rozklad chemických vazeb způsobené přítomností vody. Rychlost hydrolyzy významně urychlují vnější faktory, jako jsou teplota (nad 120 °C), kyselé nebo silně alkalické prostředí [43].

V kyselém prostředí je glykosidická vazba v celulózové molekule velmi reaktivní a podléhá **kyselé hydrolyze**. Při tomto druhu hydrolyzy dochází ke ztrátě mechanických vlastností způsobené postupným zkracováním polymerního řetězce. Pokud je kyselou hydrolyzou zasaženo 0,5 - 1 % glykosidických vazeb je papír téměř nepoužitelný [42]. Spouštěčem kyselé hydrolyzy je vodíkový kation, který reaguje s kyslíkovým atomem glykosidické vazby (volným elektronovým párem), tato reakce je velmi rychlá a na jejím konci je vznik konjugované kyseliny. V další fázi, která je oproti předchozí reakci velmi pomalá, nastává rozklad vazby  $C_1OC_4$  za přítomnosti vody a také ke krácení polymerního řetězce (zhoršení vlastností papíru). V posledním kroku se uvolňuje vodíkový kation a ten způsobuje další hydrolytický rozklad. Schéma procesu kyselé hydrolyzy je zobrazeno na obrázku 11. Kyselá hydrolyza probíhá primárně v amorfních částech celulózy či hemicelulózy, která má vyšší obsah amorfních látek a je tak ke kyselé hydrolyze mnohem náchylnější [41].





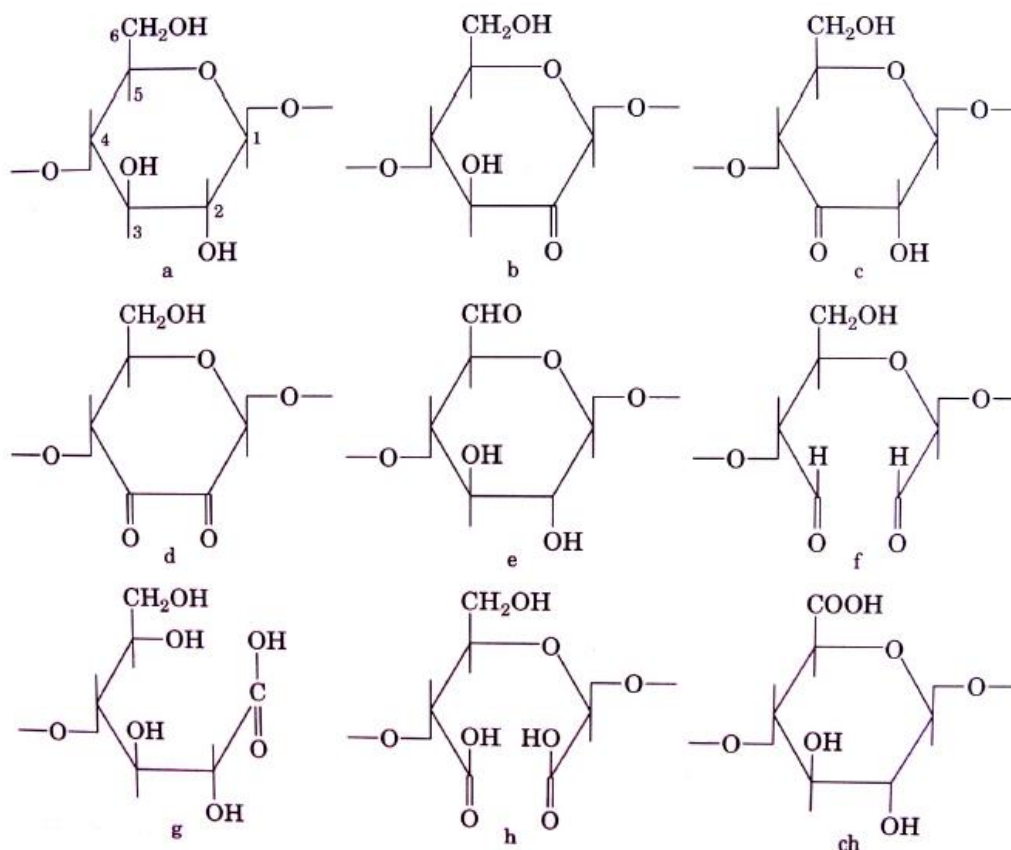
Obrázek 11 - Schéma hydrolyzy glykosidické vazby celulózy překresleno z [42]

Glykosidická vazba je v mírně alkalickém prostředí stálá, v silně alkalickém prostředí to již neplatí a nastává **alkalická hydrolyza**. Ta rozkládá poslední glykosidickou vazbu glukopyranózy, proto bývá tato reakce nazývána peeling (odlupování). První fází reakce je izomerace (změna uhlíkaté struktury) aldózy na ketózu za vzniku karbonylové skupiny nacházející se v  $\beta$ -poloze ke glykosidické vazbě. Reakce karbonylové skupiny a poslední glykosidické vazby mají za následek odstranění koncové glukopyranózy, tím vzniká nová koncová glukopyranóza a hydrolyza se opakuje [41], [42].

**Oxidace celulózy** je chemická reakce, při které se odštěpují elektrony z atomů nebo atomových skupin, to má za následek snížení záporného oxidačního čísla, tato reakce probíhá za přítomnosti vzdušného kyslíku [44]. Oxidaci mohou také podpořit i produkty vzniklé hydrolyzou celulózy. Celulóza také obsahuje skupiny, které jsou schopné autooxidace, jsou to především redukující koncové skupiny glukopyranózy [41].

Celulóza neboli vazba  $\beta$ -D-glukopyranózy obsahuje tři hydroxylové skupiny OH [41]. Právě tyto hydroxylové skupiny mohou být oxidovány za vzniku ketonových,

karboxylových a aldehydových skupin. Nejreaktivnější hydroxylovou skupinou je primární skupina vázaná na uhlíkový atom C<sub>6</sub>, s menší pravděpodobností reagují sekundární hydroxylové skupiny na atomech C<sub>1</sub> a C<sub>4</sub>, nejméně pak reagují hydroxylové skupiny na atomech C<sub>2</sub> a C<sub>3</sub> [41], [42], [44]. Změny způsobené oxidací celulózy jsou zobrazeny na obrázku 12.



Obrázek 12 - Změny celulózy způsobené oxidací překresleno z [42]

Na obrázku 12 (a) je  $\beta$ -D-glukopyranóza (celulóza). Chemické vazby (b, c, d) jsou ketonové skupiny, které mohou vznikat oxidací hydroxylových skupin na uhlíkových atomech C<sub>2</sub> a C<sub>3</sub>. Oxidací těchto hydroxylových skupin mohou také vznikat aldehydové skupiny 12 (f), které mohou vznikat i na primární hydroxylové vazbě 12 (e). Za následek těchto chemických reakcí je rozpad kovalentních vazeb mezi zoxidovanými atomy glukopyranózy. Výsledkem oxidace mohou být také karboxylové skupiny, které vznikají oxidací hydroxylových skupin na atomech C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> a C<sub>6</sub> viz obrázek 12 (g, h, ch) [41], [43].

**Fotolýza** je chemická reakce, která je vyvolána světelnou energií, převážně UV zářením [44]. Foton s sebou nese energii, ta je závislá hlavně na jeho vlnové délce a lze ji vypočítat pomocí Planckovy rovnice.

$$E = \frac{N_A \cdot h \cdot c}{\lambda} \quad (5)$$

kde  $E$  je energie fotonu [ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ],

$N_A$  je Avogadrova konstanta [ $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ],

$h$  je Planckova konstanta [ $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ],

$c$  je rychlost světla [ $2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$\lambda$  je vlnová délka dopadajícího fotonu [nm].

K přímé fotolýze chemických vazeb celulózy je potřeba energie v rozmezí 348 až 427  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . To odpovídá energii fotonů s vlnovou délkou okolo 300 až 350 nm. V tabulce 8 jsou popsány vlnové délky fotonů, jejich energie a vazby, na které působí [41], [42]. Fotony o těchto vlnových délkách jsou v denním světle zastoupeny v malé míře, navíc čistá celulóza světelné záření neabsorbuje, proto lze považovat přímou fotolýzu jako degradační proces za zanedbatelnou [41].

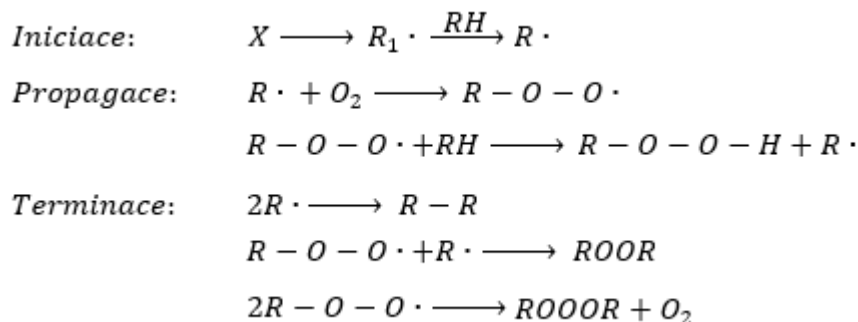
Tabulka 8 - Vlnová délka a energie fotonů působících na vazby celulózy převzato z [41]

Vlnová délka [nm]	Energie záření [ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]	Disociace vazby
280,0	427	O-H
288,9	414	C-H
307,5	389	C-O
345	348	C-C

V celulóзовém papíře bývají zastoupené fotosenzibilátory a katalyzátory, těmi mohou být plniva, barviva, kovy, inkousty a různé nečistoty, které se do papíru dostanou při výrobě. Fotosenzibilátory jsou také například acetalové, karbonylové a karboxylové funkční skupiny, které jsou následky oxidace [41]. Významným fotosenzibilátorem je také lignin a jeho chromofory, které jsou citlivé i na světlo ve viditelném spektru [42].

**Fotooxidace celulózy** je reakce, která bývá nejčastěji zahájena fotolýzou primární hydroxylové skupiny na atomu uhlíku  $\text{C}_6$ , následkem fotooxidace je vznik velmi reaktivních volných radikálů ( $\text{R}\cdot$ ). Fotooxidace má tři fáze, první fází je **iniciace**, následuje **propagace**, při které se uvolňují volné radikály se vzdušným kyslíkem ( $\text{O}_2$ ), poté s uhlovodíkovým zbytkem s aktivním vodíkem (RH) za vzniku hydroperoxidů (ROOH). Třetí fází fotooxidace je **terminace**, při které rekombinují radikály a jejímž následkem je vznik produktů neradikálové povahy. Tyto produkty se dále rozkládají za vzniku aldehydů nebo ketonů celulózy, následkem jejich rozkladu může být vznik vody a formaldehydu. Celý chemický proces je popsán na obrázku 13 [44].

Na průběh fotooxidace mají značný vliv ionty přechodových kovů (mědi, manganu, olova, železa), tyto kovy jsou považovány za katalyzátory fotooxidace, a to i ve velmi malém množství, řádově stačí i miliontiny objemu (ppm). Tyto ionty rozkládají vzniklé hydroperoxydy (ROOH) za snižujícího oxidačního stupně kovu, to má za následek možnost reakce s dalším hydroxidem a opětovné navýšení oxidačního stupně [42].



Obrázek 13 - Chemický proces fotooxidace překresleno z [44]

**Sítování celulózy** je způsobené kombinací výše uvedených degradačních procesů. Stárnutím papíru se zvyšuje jeho celková pevnost, ale zároveň klesá pevnost jednotlivých vláken a papír křehne. Křehnutí papíru je následkem vzniku nových intra- a intermolekulárních příčných vazeb.

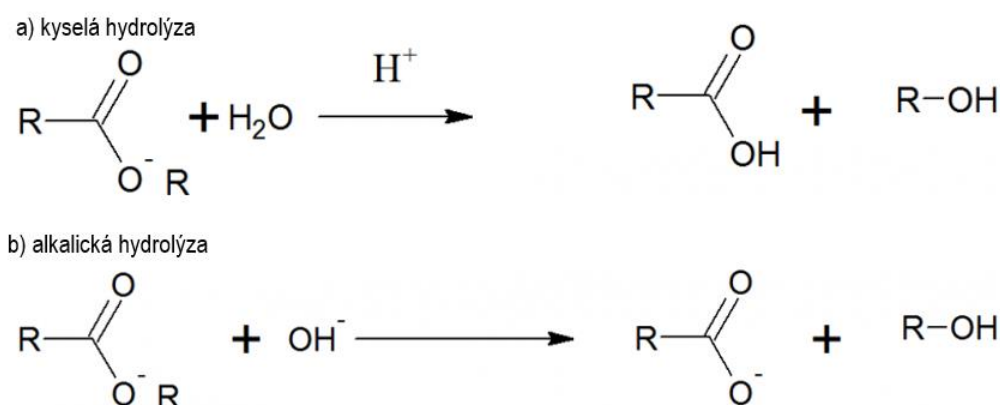
Aldehydové skupiny vznikající při oxidaci reagují s hydroxylovými skupinami a vznikají příčné poloacetalové vazby. Dalšími příčnými vazbami jsou poloketalové, ty vznikají reakcí ketonových skupin s jinými celulóзовými řetězci. Podobně mohou reagovat karboxylové skupiny s hydroxylovými skupinami celulózy za vzniku esterových vazeb. Další produkty degradací celulózy obsahující karbonylové skupiny jsou také reaktivní s hydroxylovými skupinami, v těchto případech pak vznikají acetaly a ketaly. Všechny tyto reakce probíhají v kyselém prostředí [41], [42].

### 3.2 Degradální procesy v přírodních esterech

Přírodní estery vznikají reakcí přírodních olejů s alkoholy neboli esterifikací, ta je popsána v kapitole 1.2 - Rostlinné oleje. Podobně jako u papíru i u přírodních esterů závisí jejich životnost na surovinách ze kterých jsou vyrobeny (vnitřní faktory) a také na prostředí, kterému jsou vystavovány (vnější faktory). Hlavními degradačními procesy přírodních esterů jsou **hydrolýza, polymerace, oxidace a hydrogenace** [20], [45].

**Hydrolýza** je reakce přírodních esterů s kyselinami a zásadami za přítomnosti vody. Hydrolýza může nastat i pouze za přítomnosti vody, ale tato reakce je velmi málo

pravděpodobná, protože voda je téměř nereaktivní. Hydrolýza přírodních esterů je opačnou chemickou reakcí esterifikace. Produkty **kyselá hydrolýzy** jsou kyseliny (nejčastěji karboxylové) a alkoholy (například glycerol). Alkoholy vznikají i při **alkalické hydrolýze**, druhým produktem alkalické hydrolýzy jsou soli (nejčastěji draselné nebo sodné). Na obrázku 14 jsou obecné chemické rovnice obou hydrolýz, „R“ v rovnicích značí alkoholový zbytek, který je závislý na druhu esteru.



Obrázek 14 - Hydrolýza organických esterů překresleno z [46]

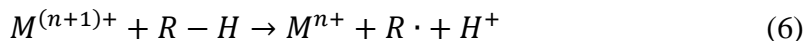
**Oxidace přírodních esterů** je reakce uhlovodíkových řetězců s kyslíkem, existuje několik druhů oxidačních reakcí: autooxidace, oxidace hydroperoxydu nebo peroxidem vodíku, oxidace kovy, oxidace singletovým kyslíkem a oxidace katalyzovaná enzymy. Poslední dvě reakce jsou reakce řízené, které se uplatňují především v potravinářství [47].

**Autooxidace** nastává při kontaktu esterů se vzdušným kyslíkem, za běžných skladovacích teplot reagují s kyslíkem pouze nenasycené mastné kyseliny, při zvýšených teplotách od cca 100 °C reagují i kyseliny nasycené. Ke spuštění autooxidace je potřeba energie, která rozštěpí C-H vazbu uhlíkového řetězce. Tato energie může být dodána ve formě tepla, radioaktivního záření nebo UV záření, chemická reakce je pak obdobná jako fotooxidace celulózy viz obrázek 12. V prvním kroku (iniciace) dochází ke štěpení a vzniku volného vodíkového radikálu (R·). Vodíkový radikál se následně sloučí s molekulou kyslíku za vzniku peroxidového radikálu (ROO·), ten odtrhne atom vodíku z jiné molekuly nenasycené mastné kyseliny a vznikne hydroperoxid (ROOH) a další volný radikál. Který může být součástí další iniciace nebo zreagovat s jiným volným radikálem za vzniku neradikálového produktu (terminace) [47]. Primárními produkty autooxidace jsou tedy **hydroperoxydy nebo peroxydy vodíku**. Sekundárními produkty pak mohou být ketony a aldehydy, ty způsobují zápach a jsou jedovaté. Sekundárním produktem je také rozklad karboxylových kyselin na kyseliny nižší úrovně [45]. Hydroperoxydy a peroxydy vodíku jsou

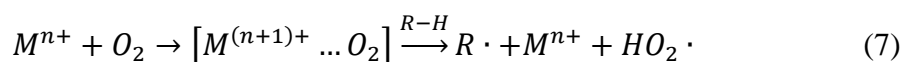
velmi reaktivní a mohou urychlovat autooxidaci. Tyto látky mohou v přírodních esterech reagovat třemi způsoby, tyto reakce se rozlišují dle změny počtu atomů uhlíku. Reakce, které nemění počet atomů uhlíku, dále reakce, které štěpí molekulu, produkty těchto reakcí jsou výše zmíněné aldehydy a uhlovodíky. Při třetí možnosti se zvyšuje počet uhlíků v molekule, to má za následek polymeraci esteru [47].

V transformátoru mohou být spouštěči **oxidace kovy**. Kovy způsobujícími oxidaci jsou hlavně železo a měď, dále pak mangan, kobalt či nikl. Jedná se o kovy, které oxidují ztrátou jednoho elektronu. Kovy nebo jejich soli se mohou podílet na všech fázích oxidace. Při **iniciační** reakci se uvolňuje elektron z kovu (například železa) za vzniku volného radikálu, to platí pro kovy s vyšší valencí  $M^{(n+1)+}$ . Iniciovat oxidaci mohou i kovy s nižší valencí  $M^{n+}$ , kdy při reakci kovu a kyslíku kovový prvek ztrácí jeden elektron. Produkty této reakce jsou též uhlovodíkové radikály ( $R\cdot$ ), dále kovy s vyšší valencí a také reaktivní formy kyslíku například superoxidový radikál ( $HO_2\cdot$ ). Rovnice 6 a 7 popisují chemické reakce iniciace. Superoxidový radikál není s nenasycenými kyselinami příliš reaktivní, reaktivnější jsou hydroxylové radikály, které jsou spouštěčem autooxidace.

- a) iniciační reakce – kov s vyšší valencí (vznik volných radikálů)

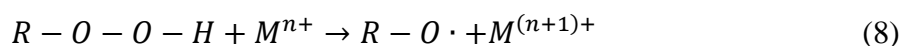


- b) iniciační reakce – kov s nižší valencí (vznik superoxidových radikálů)

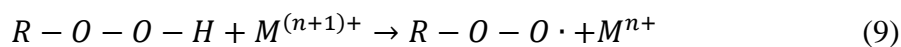


Při **propagační** části oxidace reagují kovy s nižší valencí s hydroperoxy (ROOH) za vzniku alkoxylových radikálů a zároveň přecházejí do vyšší valence. Následně opět reagují s hydroperoxy za vzniku peroxylových radikálů a opětovnému přechodu do nižší valence. Alkoxylové i peroxylové radikály následně urychlují štěpení iontů kovů a tím zvyšují rychlost autooxidace. Chemické reakce jsou popsány rovnicemi 8 a 9.

- a) propagační reakce – kovy s nižší valencí (vznik alkoxylových radikálů)



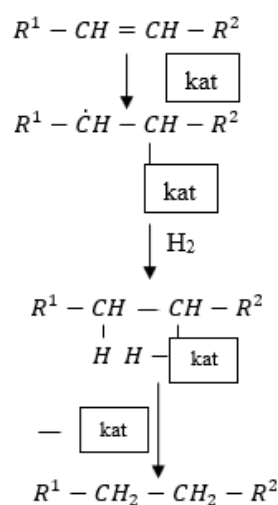
- b) propagační reakce – kovy s vyšší valencí (vznik peroxylových radikálů)



Při nárůstu volných radikálů může nastat třetí část oxidace a to **terminace**, kovy v tomto případě působí jako inhibitory oxidace, pro terminaci je však potřeba vyšší koncentrace kovů. Volné radikály pak oxidují nebo redukují s ionty železa a mědi, produktem jsou kationty a anionty těchto kovů a vznik komplexních volných radikálů, které nejsou reaktivní [47].

**Polymerace olejů** je reakce, která nastává u olejů obsahujících nenasycené mastné kyseliny s více dvojnými vazbami. Polymerace také bývá nazývána jako vysychání [45]. Při polymeraci dochází ke spojení monomerů za vzniku vysokomolekulárních látek (polymerů). V případě přírodních esterů dochází ke spojení mastných kyselin. Katalyzátory polymerace bývají nejčastěji volné radikály [48]. Při vyšších teplotách se na sebe vzájemně vážou mastné kyseliny vazbou C-C a vznikají cyklické nebo lineární polymery. Při přítomnosti kyslíku roste počet volných radikálů obsahujících kyslík, rekombinací těchto volných radikálů vznikají podobně jako za vyšších teplot lineární a cyklické C-C polymery, ale navíc ještě lineární polymery s peroxidovými vazbami (COOC) a lineární polymery s etherovými vazbami (COC). Tento druh polymerace je nazýván oxypolymerace a je to sekundární produkt oxidace [47].

**Hydrogenace** v přírodních esterech nastává při reakci nenasycených mastných kyselin s vodíkem. Hydrogenací se u nenasycených mastných kyselin snižuje počet dvojných vazeb v molekule, z olejů se v důsledku hydrogenace stávají tuky [45]. Schéma hydrogenace nenasycených mastných kyselin plynným vodíkem za přítomnosti kovových katalyzátorů je na obrázku 15. Kde  $R^1$  je uhlovodíkový zbytek mastné kyseliny,  $R^2$  je zbytek s esterovou skupinou a „kat“ je katalyzátor [47]. Produktem hydrogenace jsou transmastné nebo nasycené mastné kyseliny [49], dále alkany, sekundární a primární alkoholy [50].



Obrázek 15 - Schéma hydrogenace nenasycených mastných kyselin překresleno z [47]

## 4 Experiment zrychleného stárnutí

Cílem experimentu bylo zjistit vliv vlhkosti a teploty na vlastnosti elektroizolačního systému olej – papír, kde konkrétně elektroizolační systém byl tvořen olejem ENVITRAFOL a transformátorovou lepenkou, vinutí transformátoru bylo nahrazeno měděným plátkem. Produktový list oleje ENVITRAFOL s jeho parametry je v příloze A. V praxi může být elektroizolační systém v transformátoru po celou dobu jeho životnosti, ta může být 30 až 40 let [51] při nízkých provozních teplotách do 90 °C. V experimentu byl čas nahrazen zvýšenou teplotou. Experiment byl prováděn pro tři teploty, tři různé hodnoty vlhkosti a dvě doby expozice na každou teplotu. Pro vyhodnocení experimentu byly změřeny neelektrické parametry obsah vody a číslo kyselosti vzorků po expozici a elektrické parametry ztrátový činitel a permitivita vzorků pro teploty od 30 °C do 90 °C.

### 4.1 Příprava vzorků

Každý vzorek z celkových 18 byl tvořen 100 ml oleje ENVITRAFOL do kterého byl vložen měděný plátek o rozměrech 0,1 x 3 x 28 mm, a transformátorová lepenka s rozměry 20 x 20 mm. Olej se společně s měděným plátkem a lepenkou vložil do lahve z tmavého skla.

Jak bylo zmíněno výše, experiment byl prováděn pro tři různé vlhkosti, rozdíl vlhkostí se zajistil pomocí lepenky. Vzorky byly podle vlhkosti rozděleny na „DRY“, „AMBIENT“ a „WET“. Lepenka pro „DRY“ vzorky se vložila na 24 hodin do pece o teplotě 85 °C, lepenka pro „AMBIENT“ byla vystavena teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 47 % po dobu 168 hodin. Lepenka pro „WET“ vzorky se vložila na 24 hodin do klimatické komory o teplotě 40 °C a relativní vlhkosti 70 %. Expozice lepenky jsou popsány v tabulce 9.

Tabulka 9 - Parametry expozic lepenek

Druh vzorku dle vlhkosti	Teplota (°C)	Relativní vlhkost (%)	Čas (hod)
DRY	85	-	24
AMBIENT	23	47	168
WET	40	70	24

Dále byly vzorky rozděleny podle teploty a doby expozice na „long“ a „short“. Hodnoty teplot a časy expozic jsou popsány v tabulce 10. Každý vzorek byl tedy popsán teplotou, dobou expozice a vlhkostí lepenky, například **160 °C, short, dry** podobně jako na obrázku 16. Po vložení lepenky a měděných plátků do lahviček s olejem bylo potřeba co nejrychleji začít s tepelnou expozicí.



Tabulka 10 - Teplota a doba expozice vzorků

Druhy vzorku	Teplota (°C)	Doba expozice (hod)
T1 short	160	800
T1 long	160	1200
T2 short	140	1000
T2 long	140	1500
T3 short	120	1600
T3 long	120	2000

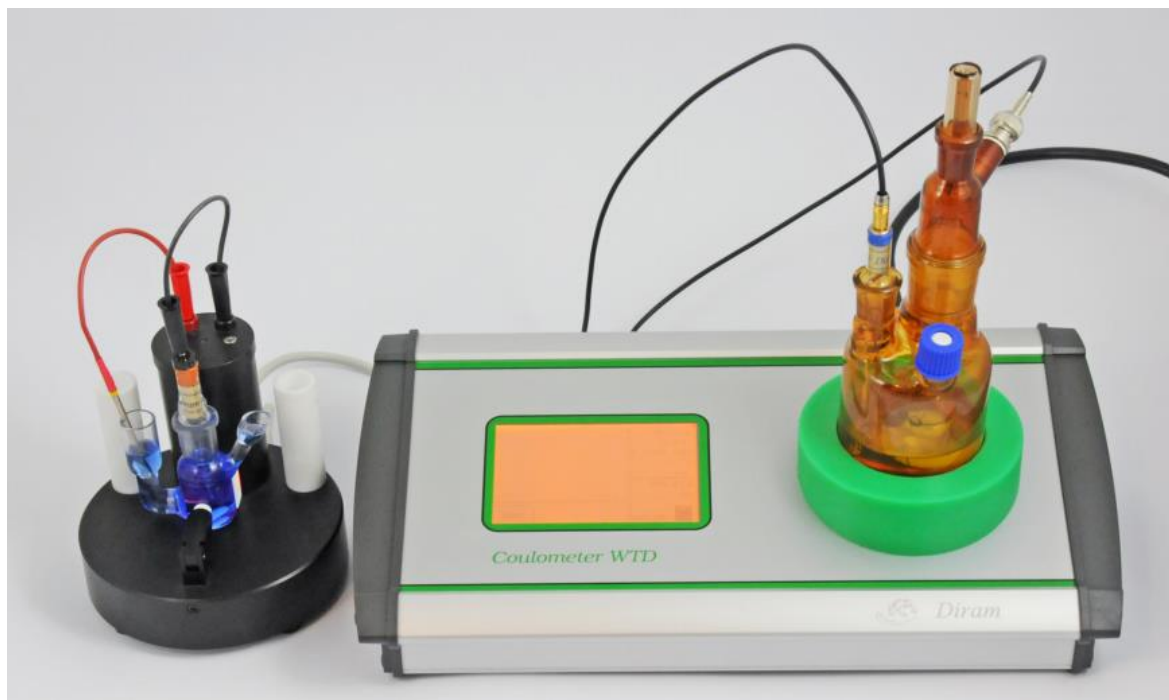


Obrázek 16 - Připravený vzorek

Po skončení expozice bylo potřeba mírně pootevřít a okamžitě uzavřít láhev se vzorkem z důvodu podtlaku, který by se mohl při vychladnutí v láhvi vytvořit. Dalším krokem experimentu bylo měření, které by mělo následovat co nejdříve po vychladnutí vzorku, postup měření je popsán v následujících kapitolách.

## 4.2 Měření obsahu vody a čísla kyselosti vzorků

Pro měření obsahu vody a čísla kyselosti vzorků byl použit měřicí přístroj **Coulometer WTD s modulem KOH** od firmy Diram s.r.o. viz obrázek 17. Tento přístroj měří obsah vody titrační metodou dle Karl Fischera. Stanovení čísla kyselosti je založeno na titraci kyselých složek testovaného vzorku alkoholovým roztokem hydroxidu sodného. Měření lze provádět na displeji přístroje, nebo pomocí softwaru výrobce na počítači. Podrobný návod měření je popsán v manuálu výrobce [52].



Obrázek 17 - Coulometer WTD s modulem KOH od firmy Diram s.r.o. převzato z [52]

Postup pro **měření obsahu vody**. Titrační nádobka přístroje se naplní 200 ml roztoku AQUATITRON BD, do kterého se vhodí magnetické míchátko. Pomocí elektrod se nádobka uzavře, vloží do stojánku přístroje a do přístroje se rovněž připojí elektrody. Po spuštění přístroje je potřeba nastavit druh měření. V menu přístroje se nastaví stanovení vody v nádobce bez diafragmy (H<sub>2</sub>O/BD). Přístroj se začne kompenzovat, po ukončení kompenzace je přístroj připraven k měření, to signalizuje pomocí ikonky v pravém dolním rohu. Vzorek oleje může být v rozmezí hmotností 0,02 g až 2 g. Vzorek se odebere pomocí injekční stříkačky a zváží na laboratorní váze. Po kompenzaci se vzorek vstříkne do titrační nádoby, zváží se váha injekční stříkačky po vstříknutí, rozdíl obou vážení je pak hmotnost navážky, která se vloží do přístroje. Po ukončení měření přístroj zapípá a na displeji se objeví hodnota obsahu vody v oleji.

Pro měření **čísla kyselosti** je potřeba k přístroji připojit modul Coulometer KOH. V menu přístroje se změní typ měření na stanovení čísla kyselosti. Modul pro měření KOH je vidět na obrázku 17 vlevo. Jedná se o tříhrdlou skleněnou titrační nádobku. Do prostředního hrdla se vloží teflonové magnetické míchátko a pomocí injekční stříkačky také 10 ml katolytu Acititron B6 nebo Acititron B6Li, poté se nádobka uzavře zátkou s elektrodou. Anodová část nádoby (na obrázku 17 vlevo) se naplní cca 1 ml Acititronu P nebo Acititronu PLi, zde je potřeba aby hladina v anodové části byla nižší než hladina v hlavní části nádoby, jinak by docházelo k pomalé kompenzaci a zvýšení kompenzačního

proudu. Do anodové části nádoby se ještě vloží elektroda s červeným kabelem. Podobně jako u měření obsahu vody, přístroj začne kompenzovat v průběhu kompenzace se začne měnit barva roztoku z modré na fialovou, po kompenzaci je přístroj připraven k měření. Nástřik vzorku probíhá stejně jako u měření obsahu vody, liší se ale velikost vzorku, která je v tomto případě 0,01 až 0,5 g. Injekční stříkačka se vzorkem se zvaží, vzorek se vstříkne do třetího hrdla modulu KOH a prázdná stříkačka se opět zvaží, rozdíl hmotností je hmotnost nástřiku vzorku. Po dokončení měření přístroj zapípá a na obrazovce se objeví hodnota čísla kyselosti.

### 4.3 Měření ztrátového činitele a permitivity oleje

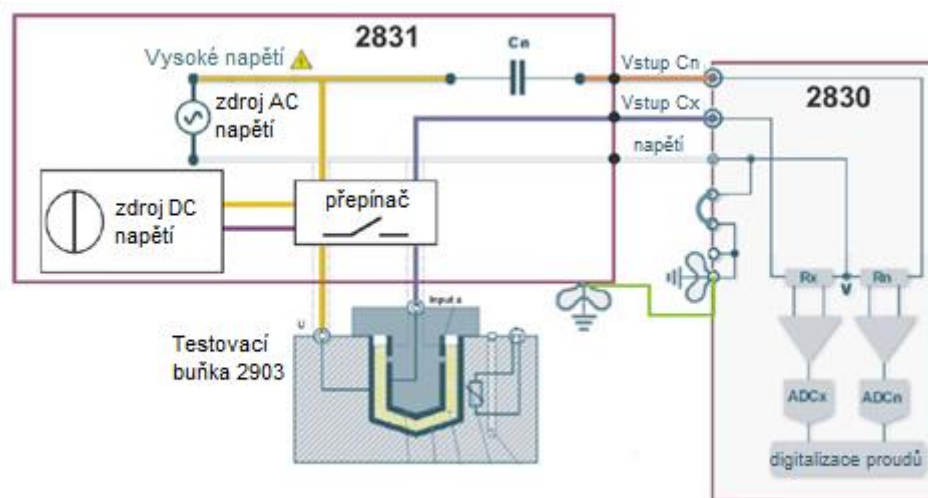
Ztrátový činitel a permitivita oleje byly měřeny přístrojem Tettex 2830/2831 od firmy Haefely Hipotronics. Zařízení se skládá ze dvou hlavních částí. Jednotky 2830 tato část obsahuje řídicí jednotku, vyhodnocovací jednotku a také uživatelské prostředí. A jednotky 2831, která obsahuje kapacitní normál, zdroje střídavého a stejnosměrného napětí do 2,5 kV a regulátor teploty. K těmto jednotkám se připojují testovací buňky 2903 pro měření kapalných dielektrik a 2914 pro měření pevných dielektrik. Testovací buňka 2903 je zobrazena na obrázku 18. Podrobný návod měření je popsán v manuálu výrobce [53].



Obrázek 18 - Testovací buňka 2903 pro měření kapalných dielektrik

Schéma měřicího obvodu pro měření ztrátového činitele a permitivity oleje je zobrazeno na obrázku 19. Měřicí systém má dvě větve, které jsou napájeny ze zdroje střídavého napětí. V jedné větvi kapacitní normál o kapacitě  $C_N$  tímto kondenzátorem

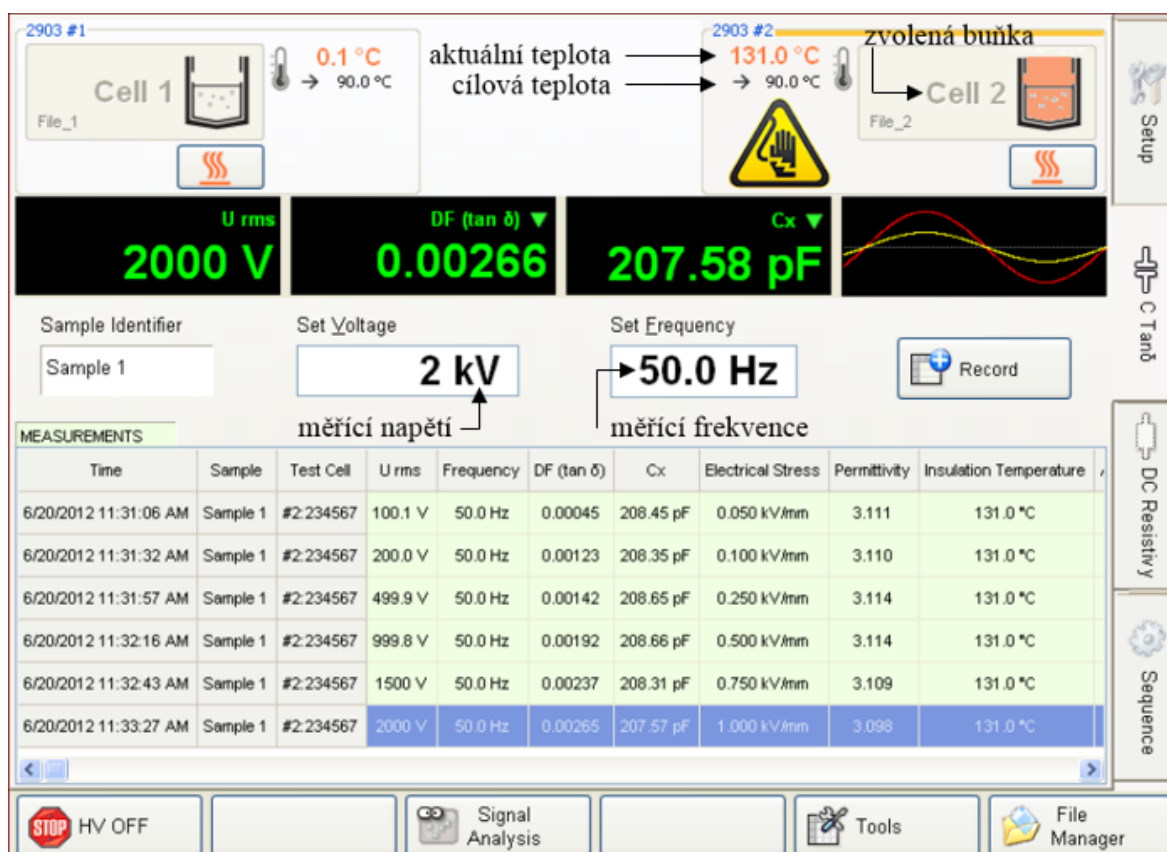
protéká proud  $I_N$ . Ke druhé větvi je připojena testovací buňka s dielektrikem o kapacitě  $C_X$ , kterou protéká proud  $I_X$ . Oba proudy jsou měřeny velmi přesnými odporovými bočníky. Následuje digitalizace hodnot proudů a vyhodnocení pomocí počítače.



Obrázek 19 - Schéma systému pro měření ztrátového činitele a permitivity oleje překresleno z [53]

Postup pro měření ztrátového činitele a permitivity oleje na přístroji Tettex 2830/2831. Po zapnutí přístroje je potřeba nechat přístroj aklimatizovat po dobu 30 min. Po aklimatizaci přístroje se do testovací buňky 2903 pomocí injekční stříkačky vstříkne 40 ml oleje a buňka se připojí k přístroji. Obrazovka přístroje je zobrazena na obrázku 20, nejdříve je potřeba zvolit buňku, ke které je vzorek fyzicky připojen. Měření probíhalo v rozmezí **30 °C až 90 °C** a bylo prováděno v **10 °C** intervalech. Při zahřívání vzorku bylo potřeba pro všechny vzorky udržet stejný postup zahřívání. Postup zahřívání vzorků při tomto experimentu je uveden na příkladu. Při zahřátí vzorku na 40 °C byla cílová teplota na přístroji nastavena na 35 °C a spuštěna funkce „heating“ po jejím dosažení byla nastavena teplota 37 °C a následně 40 °C. Po ustálení teploty na požadované hodnotě byla vypnuta funkce „heating“ a provedeno měření ztrátového činitele a permitivity. Pro každou teplotu byl postup stejný.

Měření ztrátového činitele a permitivity probíhalo zároveň, měřicí napětí bylo  $U_{\text{rms}} = 500 \text{ V}$  a frekvence 50 Hz. Po ustálení teploty a nastavení napětí a frekvence se měření spustí tlačítkem „High voltage ON“ (na obrázku 20 „HV OFF“.) Ze začátku jsou hodnoty  $\text{tg } \delta$  a  $C_x$  tmavě zelené, při zesvětlení je měření přesné a lze pomocí tlačítka „record“ hodnoty zapsat a měření tlačítkem „HV OFF“ ukončit.



Obrázek 20 - Obrazovka přístroj TETTEX měření ztrátového činitele a permitivity překresleno z [53]

#### 4.4 Měření ztrátového činitele a permitivity lepenky

Měření ztrátového činitele a permitivity lepenky v závislosti na teplotě a frekvenci bylo prováděno pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie na přístroji Novocontrol Alpha A. Širokopásmová dielektrická spektroskopie je moderní diagnostická metoda, která zjišťuje chování dielektrických materiálů v elektrostatickém poli o širokém rozsahu frekvencí.

Zařízení Novocontrol Alpha A se skládá z analyzátoru kmitočtu s generátorem sinusového signálu, který umožňuje měření v rozsahu frekvencí od  $3 \cdot 10^{-6}$  Hz do  $4 \cdot 10^7$  Hz [54]. Součástí přístroje je aktivní elektrodový systém typu ZGS, který obsahuje blok pro zpracování diagnostického signálu. Buňka elektrodového systému je tvořena dvěma válcovými pozlacenými elektrodami, mezi které se umísťuje testovaný vzorek.

Na testovaný vzorek se pomocí generátoru přivede střídavé napětí o požadované frekvenci, dále se měří napětí  $u(t)$  a proud  $i(t)$ . Z naměřených hodnot lze určit amplitudu proudu  $I_0$  a pomocí Fourierovy transformace fázový úhel základní harmonické signálu  $i(t)$  [55].

Měření ztrátového činitele a permitivity stárnuté lepenky bylo prováděno při teplotách - 30 °C až 30 °C s krokem 10 °C. Pro každou teplotu byla provedena spektroskopie v rozsahu 0,01 Hz až 10 MHz. Vzorky stárnuté teplotou 160 °C po dobu 1200 hodin byly měřeny až do teploty 90 °C.

#### 4.5 Vyhodnocení naměřených hodnot

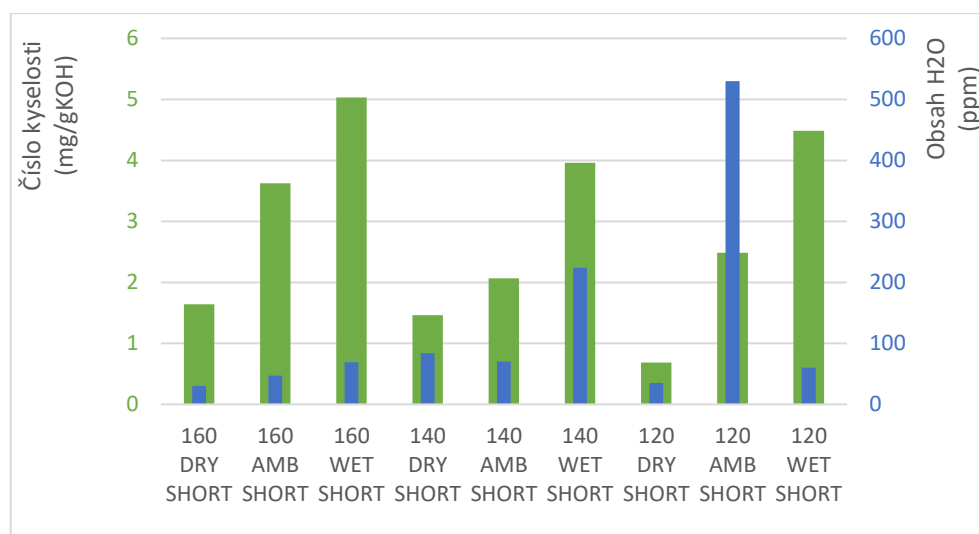
První měření, které bylo na vzorcích provedeno bylo zjišťování čísla kyselosti jednotlivých vzorků a obsahu vody v oleji. Jak bylo zmíněno v kapitole 4.2, měření probíhalo na přístroji Coulometer WTD s modulem KOH od firmy Diram s.r.o. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 11.

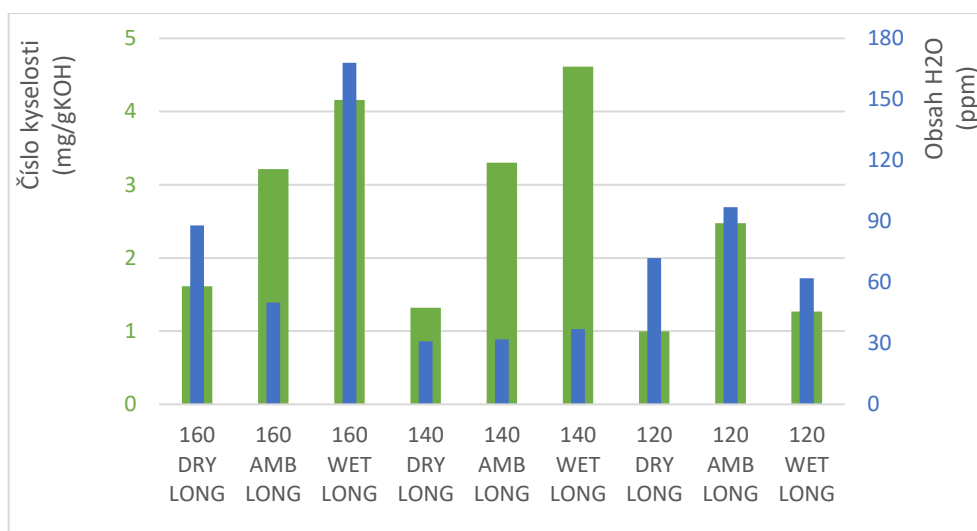
Obsah vody v oleji ve většině vzorků nepřekročil hodnotu 100 ppm, pouze u vzorku 160 WET LONG je hodnota 168 ppm a u vzorku 140 WET SHORT je obsah vody 224 ppm. U vzorku 120 AMB SHORT je hodnota obsahu vody 530 ppm, tento vzorek však vykazuje oproti ostatním vzorkům výrazně horší hodnoty i u jiných parametrů. Vzorek byl pravděpodobně po vyndání z pece a následném pootevření špatně uzavřen a dostala se do něho vzdušná vlhkost.

V případě výsledků čísla kyselosti, nabývají změřené hodnoty rozsahu od 0,686 mg/gKOH pro vzorek 120 DRY SHORT po 5,03 mg/gKOH pro vzorek 160 WET LONG. Z grafů na obrázcích 21 a 22 je vidět, že téměř u všech vzorků roste číslo kyselosti s vyšší počáteční vlhkostí lepenky vkládané do oleje, tento trend nenastává pouze u vzorků stárnutých na 120 °C po dobu 2000 hodin, tedy 120 LONG.

Tabulka 11 - Výsledky měření obsahu vody a čísla kyselosti

OLEJ	Obsah vody (ppm)	Číslo kyselosti (mg/gKOH)
160 DRY SHORT	30	1,641
160 AMB SHORT	47	3,624
160 WET SHORT	69	5,03
160 DRY LONG	88	1,613
160 AMB LONG	50	3,213
160 WET LONG	168	4,158
140 DRY SHORT	84	1,463
140 AMB SHORT	70	2,066
140 WET SHORT	224	3,959
140 DRY LONG	31	1,32
140 AMB LONG	32	3,303
140 WET LONG	37	4,615
120 DRY SHORT	35	0,686
120 AMB SHORT	530	2,485
120 WET SHORT	60	4,484
120 DRY LONG	72	0,996
120 AMB LONG	97	2,474
120 WET LONG	62	1,266

Obrázek 21 - Porovnání obsahu H<sub>2</sub>O a čísla kyselosti u jednotlivých vzorků typu SHORT



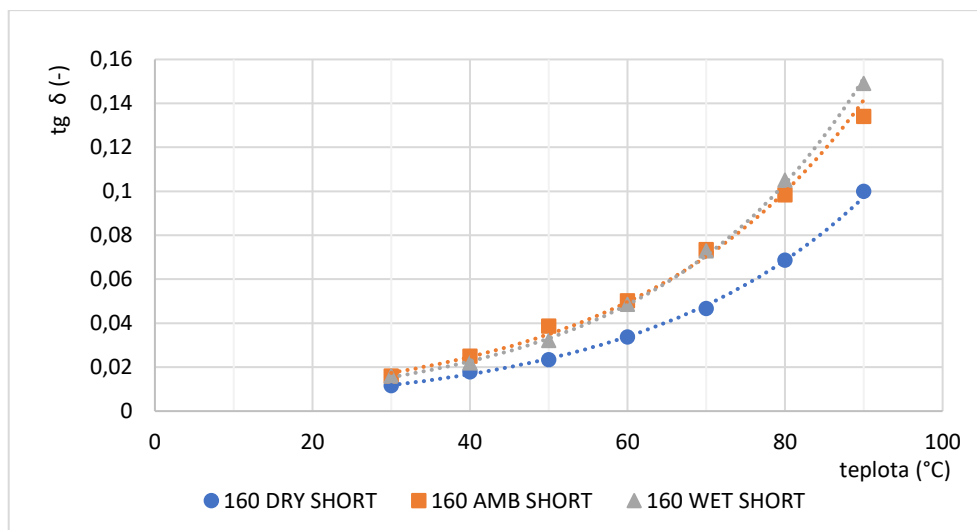
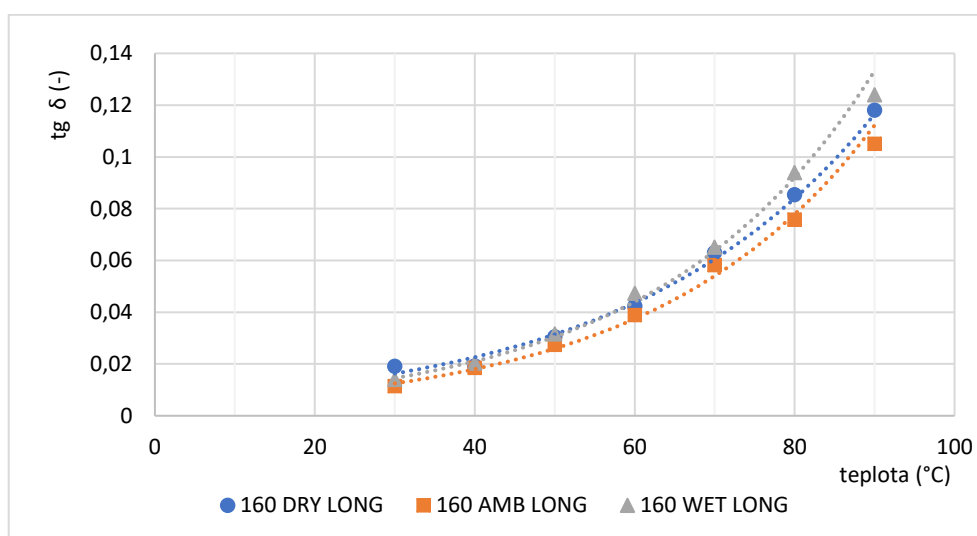
Obrázek 22 - Porovnání obsahu  $H_2O$  a čísla kyselosti u jednotlivých vzorků typu LONG

Obrázek 23 ukazuje graf závislosti ztrátového činitele oleje na teplotě pro různé počáteční vlhkosti vzorků, které byly stárnuty při teplotě 160 °C po dobu 800 hodin, měření probíhalo na přístroji TETTEX. Z grafu je vidět vliv vlhkosti na elektroizolační systém, hodnoty ztrátového činitele pro teplotu 30 °C jsou téměř stejné, liší se až v řádech tisíců, s rostoucí teplotou se projevuje vliv vlhkosti. Ztrátový činitel vzorku DRY nepřesáhl při teplotě 90 °C hodnotu 0,1. Oproti tomu vzorky AMB a WET se blížily k hodnotě tangens  $\delta$  0,15.

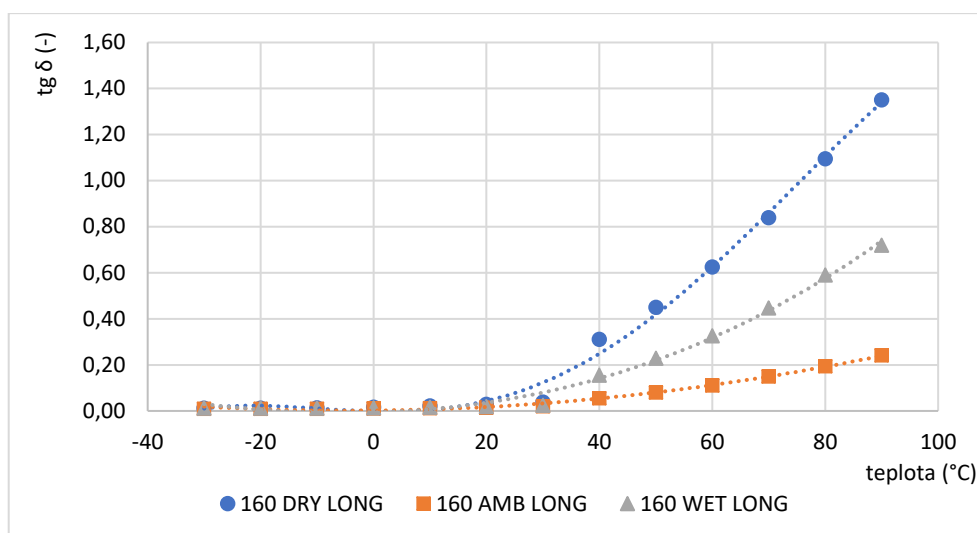
V případě vzorků, které byly stárnuty při teplotě 160 °C o 400 hodin déle dochází k prolínání hodnot ztrátového činitele viz obrázek 24. Nejvyšší hodnoty ztrátového činitele při 90 °C stále nabývá vzorek WET, tato hodnota je však nižší než u vzorku stárnutého kratší dobu. Naopak vzorek DRY vykazuje parametr tangens  $\delta$  0,118, což je více než u vzorku DRY stárnutého kratší dobu. V oleji s vyšší vlhkostí s největší pravděpodobností nastává chemická reakce, která zpomaluje stárnutí, nebo dokonce zlepšuje jeho elektrické vlastnosti. Mohlo by to být vysychání, nebo odpařování vody při nedokonalém utěsnění nádoby, k upřesnění děje by byl potřeba podrobnější experiment.

Toto měření bylo prováděno pro všechny vzorky, tabulka naměřených hodnot a grafy ostatních vzorků jsou součástí příloh B a C.



Obrázek 23 - Závislost  $\text{tg } \delta$  oleje na teplotě pro vzorky 160 SHORTObrázek 24 - Závislost  $\text{tg } \delta$  oleje na teplotě pro vzorky 160 LONG

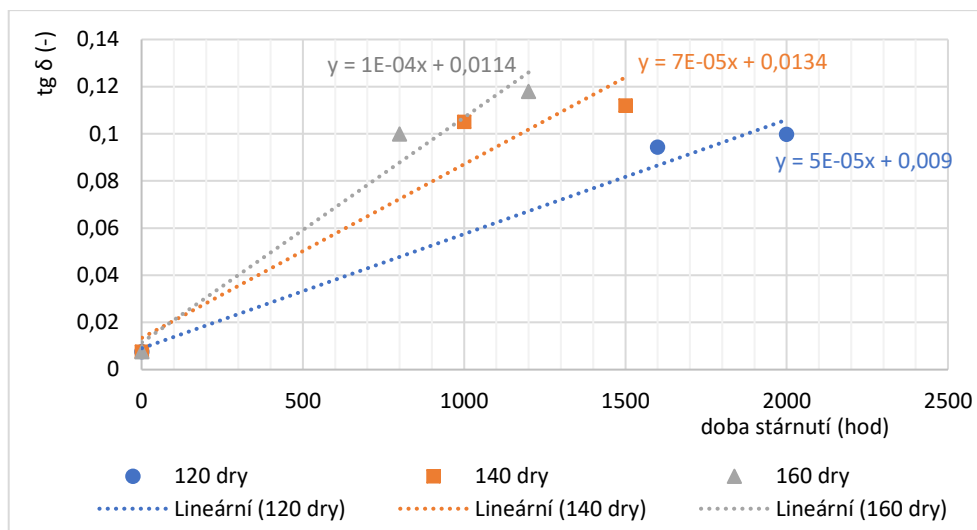
Pro výše zmíněné vzorky stárnuté teplotou 160 °C po dobu 1200 hodin bylo provedeno měření ztrátového činitele lepenky. Výstup z tohoto měření je na obrázku 25, jedná se o závislost ztrátového činitele na teplotě při frekvenci 54,88 Hz. Pro nízké teploty od -30 °C do 30 °C je ztrátový činitel téměř konstantní, jeho teploty rostou řádově v tisících. Viditelná změna nastává při hodnotách teploty 40 °C a výše, kdy ztrátový činitel roste v řádech setin až desetin v případě vzorku DRY. Nejlepší hodnoty opět vykazuje vzorek AMB stejně jako v případě ztrátového činitele oleje. Naopak nejvyšší hodnoty téměř 1,4 dosahuje vzorek DRY. Z grafu je také vidět, že ztrátový činitel lepenky má oproti exponenciální závislosti v případě oleje spíše závislost lineární.



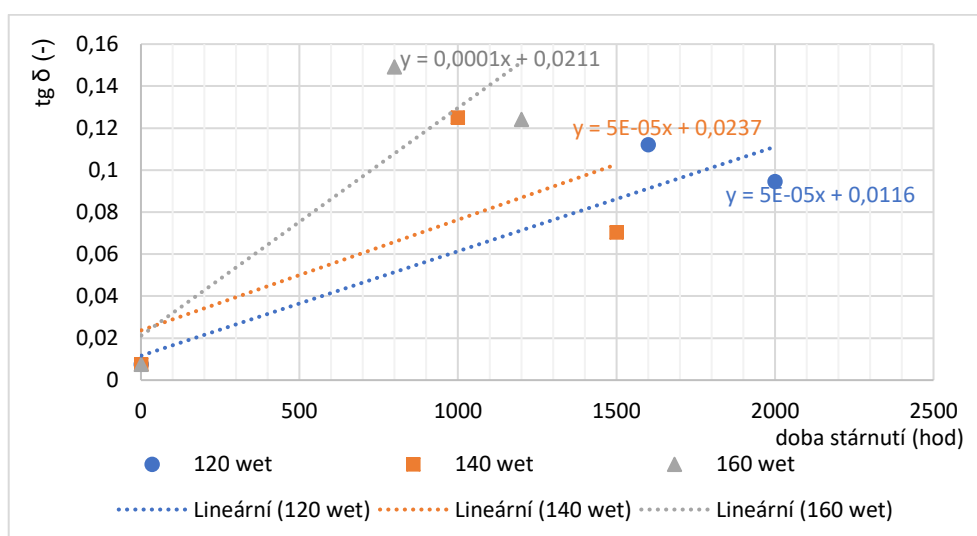
Obrázek 25 - Závislost  $\text{tg } \delta$  lepenky na teplotě pro vzorky 160 LONG

Z měření závislosti ztrátového činitele olejů přístrojem TETTEX. Vychází graf, který popisuje směrnici růstu ztrátového činitele DRY vzorků pro jednotlivé teploty. Směrnice růstu je ukazatelem vlivu teploty. Směrnice byla vytvořena pomocí tří bodů, data pro první bod byla naměřena při experimentu Katedry technologií a měření [56]. Jedná se o hodnotu ztrátového činitele při 90 °C nestárnutého oleje. Další dva body jsou hodnoty ztrátového činitele při 90 °C pro vzorky stárnuté kratší a delší dobu. Z grafu je vidět, že přímka vzorků stárnutých teplotou 160 °C je nejstrmější, má tedy i největší směrnici. Vzorky stárnuté po stejnou dobu vykazují horší vlastnosti pro teplotu 160 °C než pro teploty 140 °C či 120 °C. Na obrázku 26 je zároveň vidět, že čím déle byly DRY vzorky stárnuty, tím vyšší hodnotu má ztrátový činitel.

Stejně vyhodnocení bylo provedeno i pro vzorky WET viz obrázek 27, to potvrzuje tvrzení, že při vyšší teplotě stárnou vzorky rychleji. Ale opět poukazuje na nižší hodnotu ztrátového činitele oleje při delší době expozice, jako v případě obrázku 24.

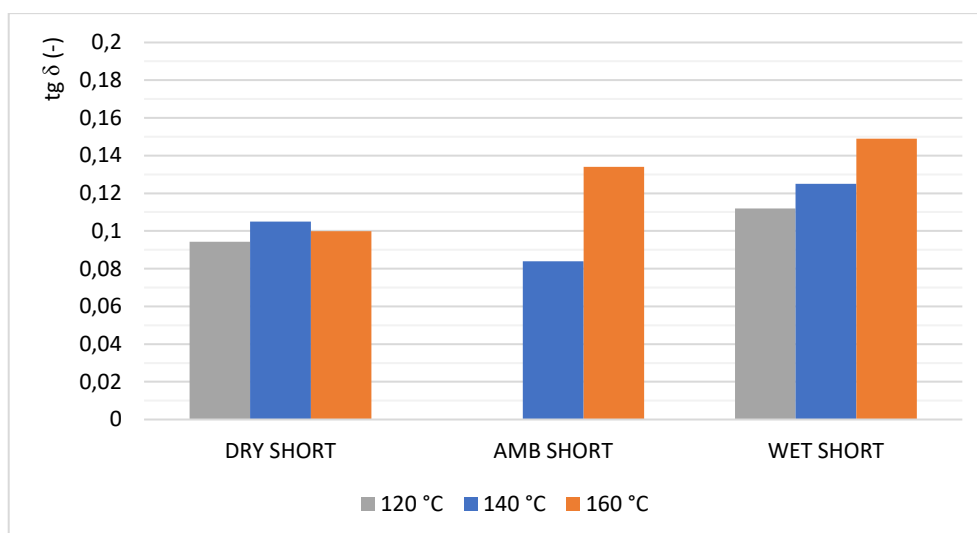


Obrázek 26 - Rychlost růstu ztrátového činitele DRY vzorků

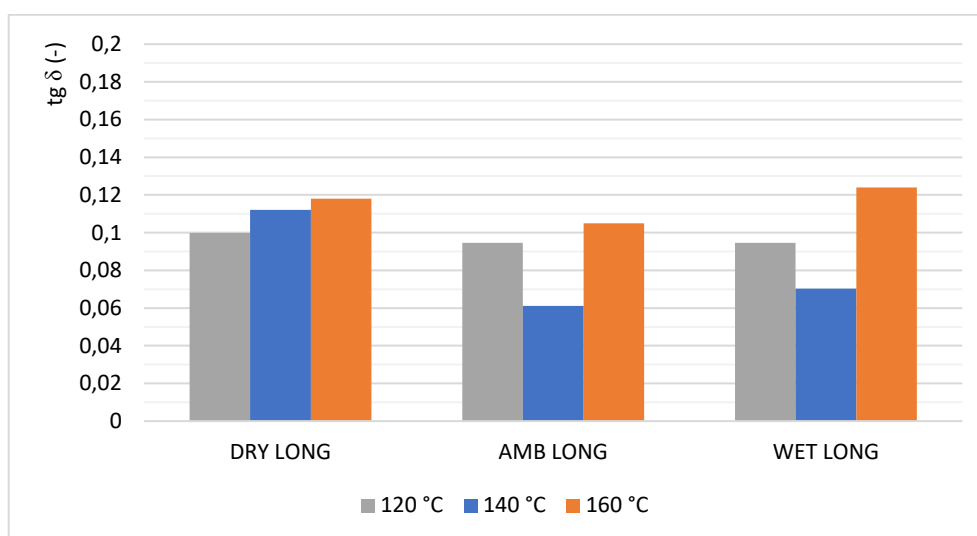


Obrázek 27 - Rychlost růstu ztrátového činitele WET vzorků

Grafy na obrázcích 28 a 29 porovnávají hodnotu ztrátového činitele při teplotě oleje 90 °C pro rozdílné vlhkosti lepenky. Na obrázku 28 jsou porovnávány vzorky typu SHORT, na obrázku 29 vzorky typu LONG. Do grafu nebyl zahrnut vzorek 120 °C AMB SHORT, který vykazuje velmi vysoké hodnoty a jak již bylo zmíněno, byl pravděpodobně ovlivněn vzdušnou vlhkostí. U pěti ze šesti vzorků vykazuje nejhorší hodnoty vždy vzorek stárnutý teplotou 160 °C, pouze u vzorků DRY SHORT jej o 0,005 převyšuje vzorek stárnutý na 140 °C. Nejnižší hodnoty byly naopak zaznamenány u vzorků AMB a WET stárnutých teplotou 140 °C po dobu 1500 hodin, ztrátový činitel těchto vzorků nepřesahuje hodnotu 0,071.

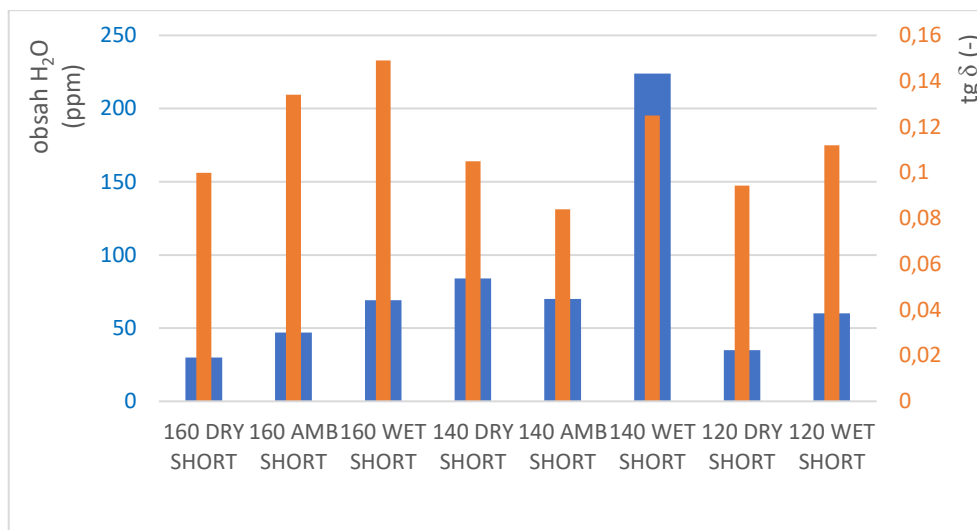


Obrázek 28 - Ztrátový činitel oleje při 90 °C vzorků SHORT

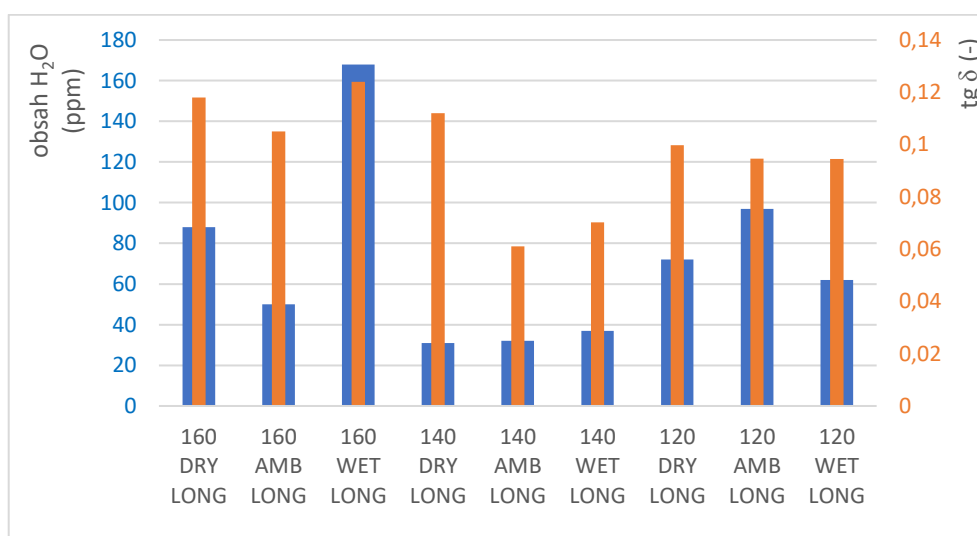


Obrázek 29 - Ztrátový činitel oleje při 90 °C vzorků LONG

Obsah vody v oleji bývá označován jako ukazatel stavu oleje. Porovnání obsahu vody v oleji a ztrátového činitele oleje při 90 °C je vyneseno na grafech na obrázcích 30 a 31, kde je modře vyznačen obsah vody v oleji a oranžově ztrátový činitel. Do vyhodnocení nebyl podobně jako v předchozím případě zahrnut vzorek AMB SHORT stárnutý na 120 °C. V případě vzorků typu SHORT lze potvrdit tvrzení, že s vyšším obsahem vody roste i ztrátový činitel. Tvrzení ale platí pouze při porovnání stejných teplot stárnutí. V případě vzorků typu LONG již toto tvrzení platí pouze pro oleje stárnuté teplotou 160 °C, u olejů stárnutých na 120 °C a 140 °C není viditelná žádná závislost mezi obsahem vody v oleji a ztrátovým činitelem oleje.

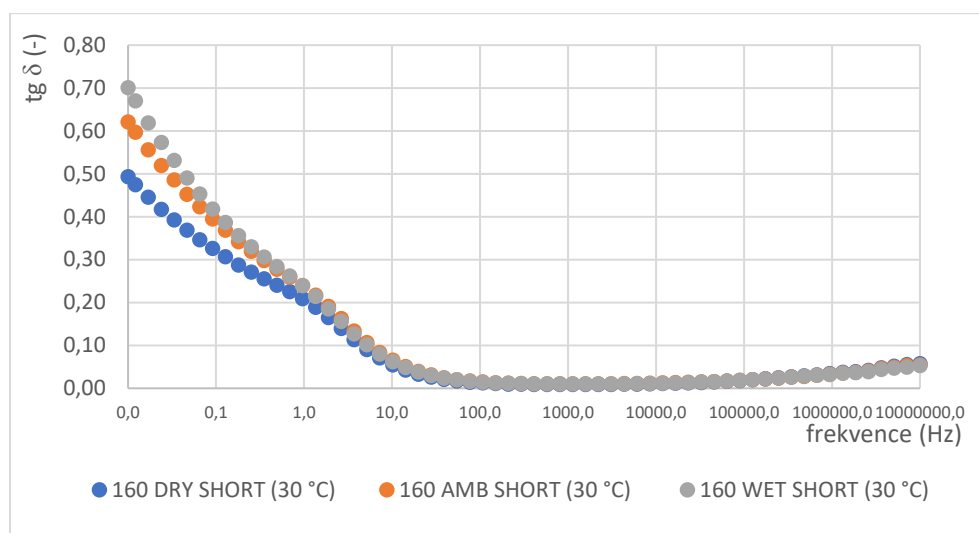


Obrázek 30 - Obsah vody v oleji a ztrátový činitel oleje při 90 °C pro vzorky typu SHORT



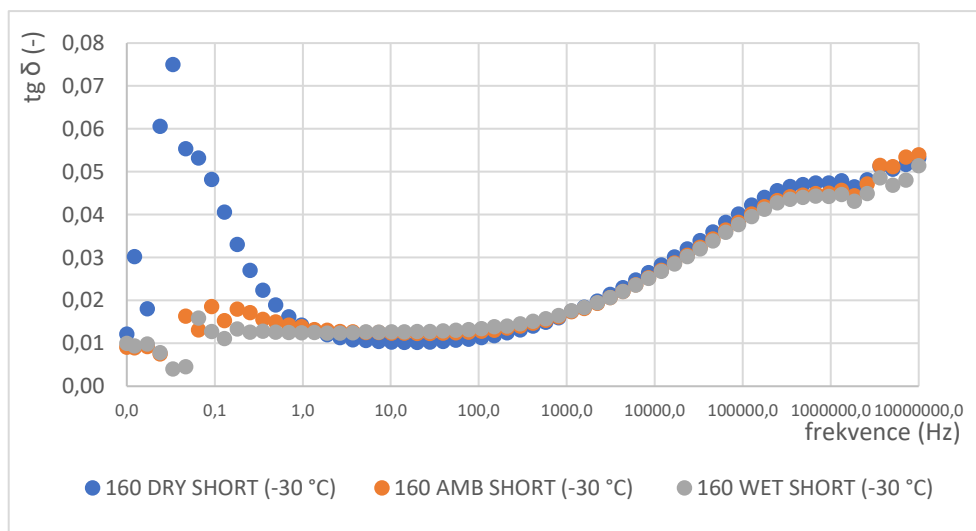
Obrázek 31 - Obsah vody v oleji a ztrátový činitel oleje při 90 °C pro vzorky typu SHORT

Graf na obrázku 32 popisuje závislost ztrátového činitele lepenky vzorků stárnutých na 160 °C po dobu 800 hodin na frekvenci při teplotě 30 °C. Ztrátový činitel zpočátku výrazně klesá s růstem frekvence, největší pokles je v rozmezí frekvencí 0 Hz až cca 100 Hz. V rozmezí frekvencí 100 Hz až 20 kHz se ztrátový činitel mění v řádech tisícín a v měřítku změn lze říci, že je konstantní. V tomto intervalu se nachází i minima ztrátových činitelů při 30 °C, a to ve všech třech případech okolo 800 Hz. Pro frekvence od 20 kHz platí mírný nárůst ztrátového činitele.



Obrázek 32 - Závislost ztrátového činitele lepenky vzorků 160 SHORT na frekvenci při teplotě 30 °C

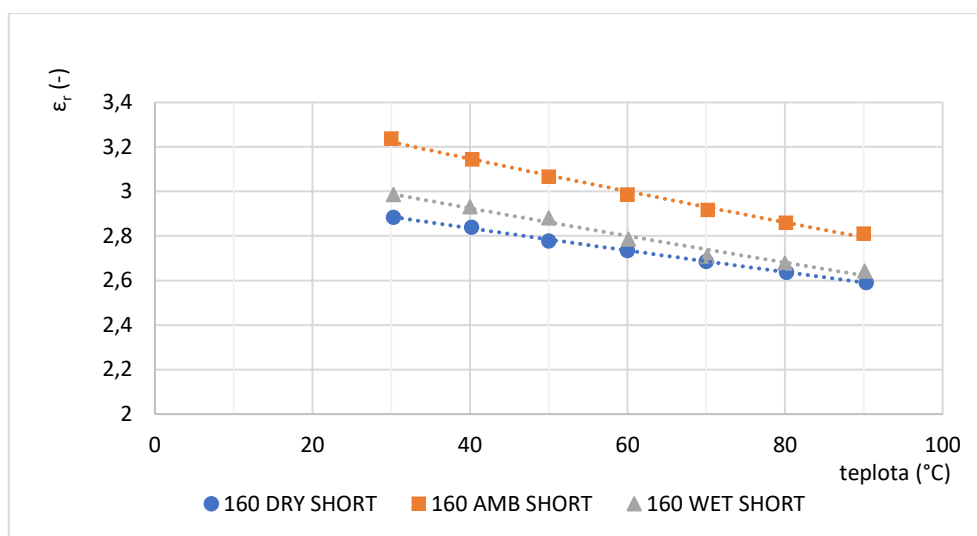
V případě měření prováděného při teplotě -30 °C se hodnoty ztrátového činitele ustalují již v okolí frekvence 1 Hz, předtím vzorek DRY rychle klesá, naopak vzorek WET spíše roste. Následně opět dochází k ustálení v intervalu od 1 do přibližně 100 Hz. Minima se v tomto případě nachází okolo 15 Hz a jsou vyšší než minima naměřená při teplotě 30 °C. Od frekvence 100 Hz nastává strmý nárůst ztrátového činitele a při frekvenci 250 kHz další ustálení. Graf je zobrazen na obrázku 33.



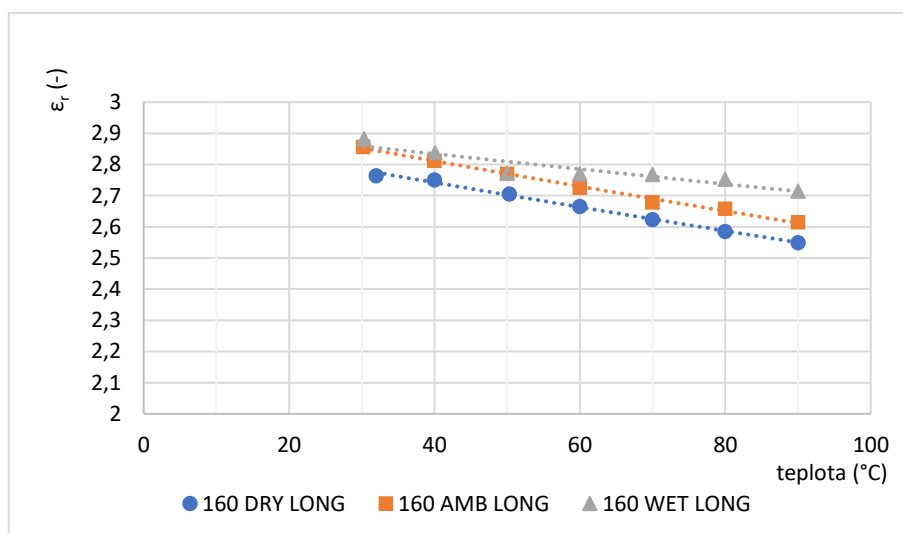
Obrázek 33 - Závislost ztrátového činitele lepenky vzorků 160 SHORT na frekvenci při teplotě -30 °C

Společně s měřením ztrátového činitele oleje probíhalo i měření relativní permitivity. Na obrázcích 34 a 35 jsou naměřené hodnoty závislosti relativní permitivity na teplotě vzorků stárnutých na 160 °C po dobu 800, respektive 1200 hodin. Grafy potvrzují teoretický předpoklad, že relativní permitivita s rostoucí teplotou klesá.

U vzorků stárnutých 800 hodin vykazuje nejvyšší hodnoty permitivity vzorek AMBIENT, permitivita vzorku WET je pak řádově o desetiny větší než permitivita vzorku DRY. I u vzorků stárnutých 1200 hodin vykazuje nejnížší hodnoty permitivity vzorek DRY, permitivity vzorků AMB a WET jsou při 30 °C téměř stejné, permitivita vzorku AMB však klesá s rostoucí teplotou rychleji. Nejnížší hodnotu mezi vzorky stárnutými na 160 °C vykazuje vzorek 160 DRY LONG při teplotě 90 °C a to 2,549, nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorku 160 AMB SHORT, který jako jediný z těchto šesti vzorků vykazuje hodnotu vyšší než 3 a to 3,238 při teplotě 90 °C. Naměřené hodnoty relativní permitivity ostatních vzorků jsou v příloze D.



Obrázek 34 - Závislost  $\epsilon_r$  oleje na teplotě pro vzorky 160 SHORT



Obrázek 35 - Závislost  $\epsilon_r$  oleje na teplotě pro vzorky 160 LONG

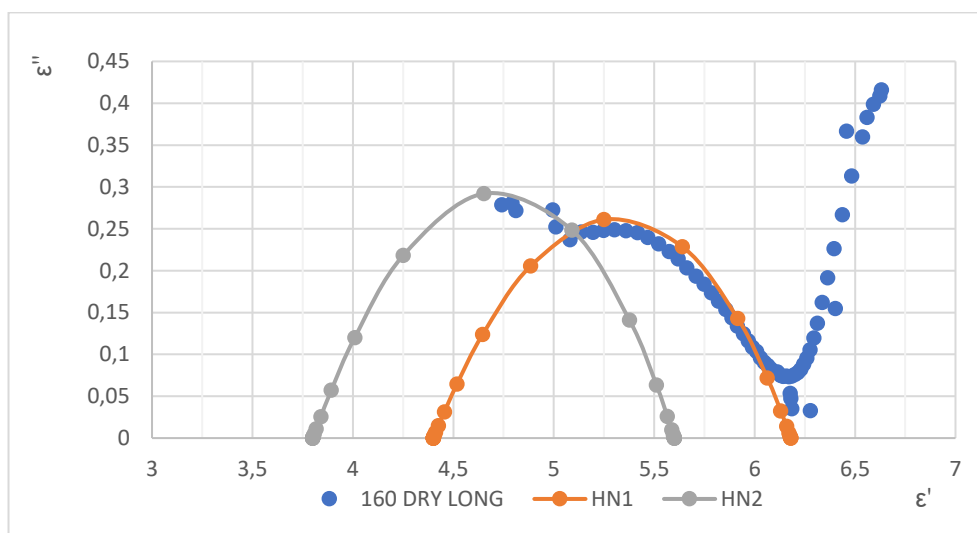
Ve spolupráci s Ing. Jaroslavem Hornakem, Ph.D. bylo provedena analýza polarizačních dějů v elektroizolačním systému, a to pomocí Havriliak a Negami rovnice 10.

Analýza byla provedena pro vzorek 160 LONG při teplotě  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pro kterou jsou lépe vidět polarizační děje než pro vyšší teploty.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + (j \cdot \omega \cdot \tau)^{1-\alpha})^{\beta}} \quad (10)$$

- kde  $\varepsilon^*$  je komplexní permitivita,  
 $\varepsilon_{\infty}$  je permitivita při frekvenci blížíící se nekonečnu,  
 $\varepsilon_s$  je statická permitivita,  
 $\alpha$  je parametr popisující šířku relaxačního spektra ( $0 < \alpha < 1$ ),  
 $\beta$  je parametr popisující asymetrii disperzní křivky ( $0 < \beta < 1$ ).

Na obrázku 36 je Havriliakův-Negamiho diagram pro vzorek 160 DRY LONG. Z tohoto grafu lze vyčíst, že v dielektriku probíhají dva polarizační jevy a nárůst  $\varepsilon''$  v pravé části je znakem přítomnosti vodivých složek. Parametry polarizačních jevů jsou uvedeny v tabulce 12.



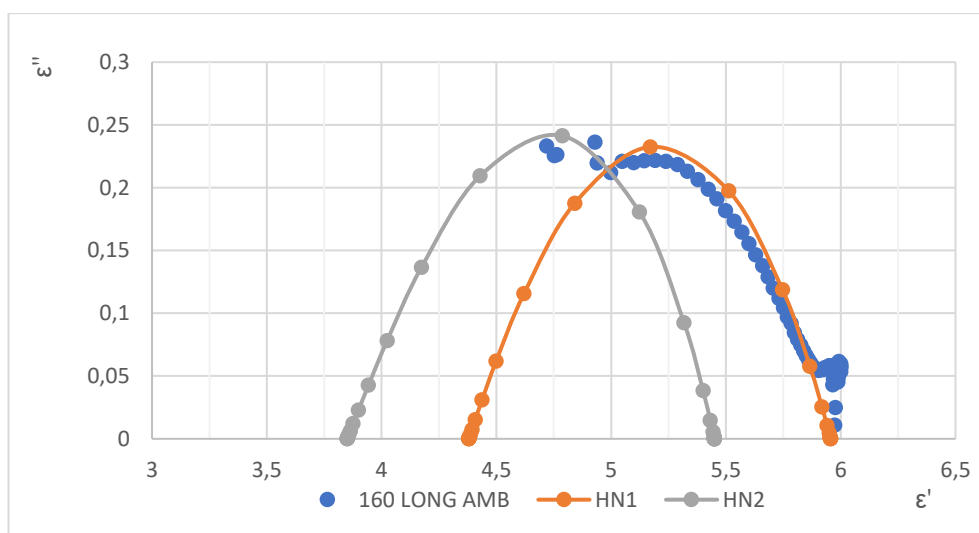
Obrázek 36 - Havriliakův-Negamiho diagram pro vzorek 160 DRY LONG

Tabulka 12 - Parametry polarizačních jevů pro vzorek 160 DRY LONG

Fit	$\alpha$	$\beta$	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_{inf}$
HN1	0,38	0,6	6.17	4.4
HN2	0,42	0.87	3.8	5.59

Vzorek 160 AMB LONG vykazuje podobně jako vzorek DRY dva polarizační děje, oproti vzorku DRY již však neobsahuje část s rostoucí  $\varepsilon''$  a dle této metody tedy neobsahuje tak výrazné hodnoty vodivostních složek. Graf pro vzorek 160 AMB LONG a parametry polarizací jsou na obrázku 37 a v tabulce 13.



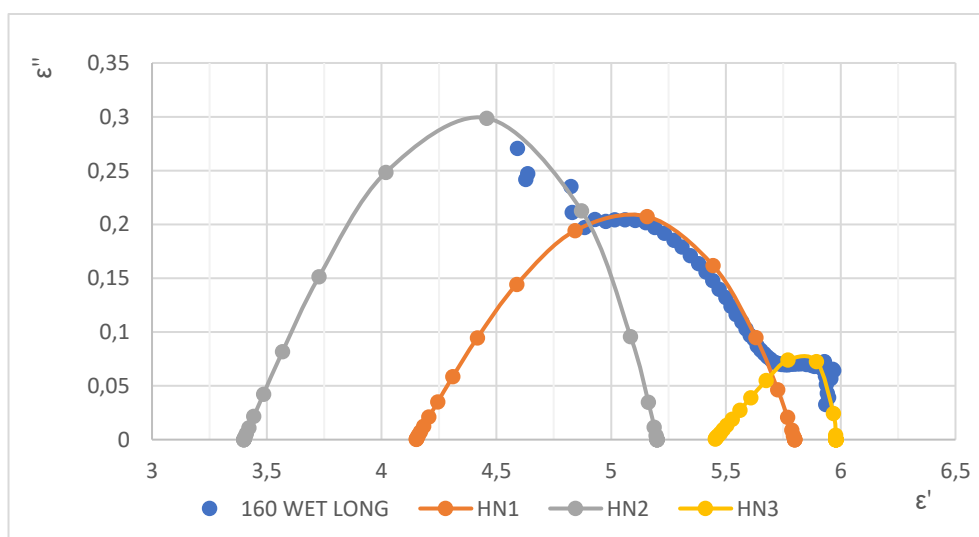


Obrázek 37 - Havriliakův-Negamiho diagram pro vzorek 160 AMB LONG

Tabulka 13 - Parametry polarizačních jevů pro vzorek 160 AMB LONG

Fit	$\alpha$	B	$\epsilon_s$	$\epsilon_{inf}$
HN1	0,38	0,82	5,956	4,38
HN2	0,44	0,68	5,45	3,85

Posledním zkoumaným vzorkem byl vzorek 160 WET LONG, graf je zobrazen na obrázku 38 a parametry polarizací v tabulce 14. Tento vzorek vykazuje podle Havriliakovi-Negamiho metody již tři polarizační děje a podobně jako vzorek AMB nemá tak výrazný obsah vodivostních složek. U tohoto vzorku lze vidět v případě polarizace označené HN3 velkou nesymetrii, a tedy nízkou hodnotu parametru  $\beta$ .

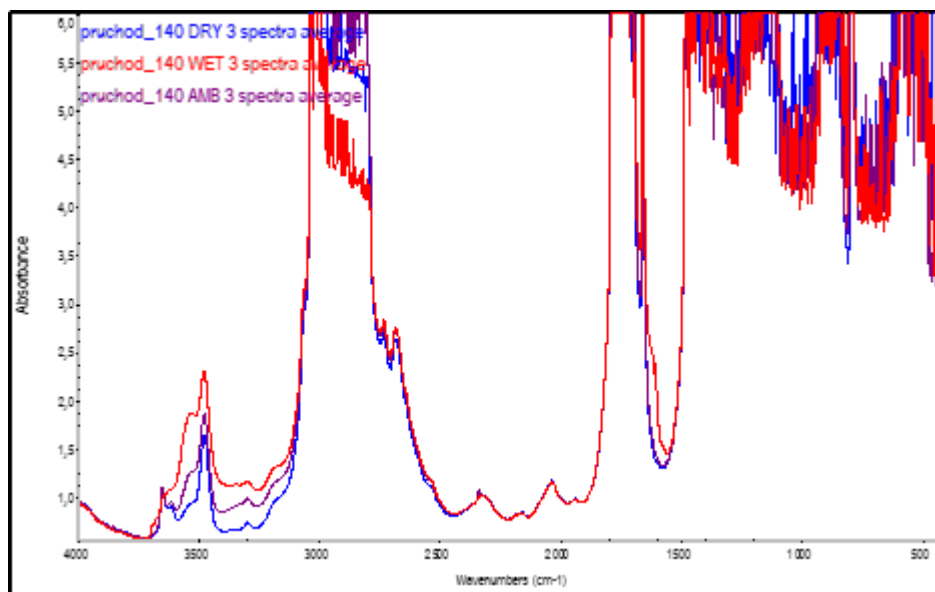


Obrázek 38 - Havriliakův-Negamiho diagram pro vzorek 160 WET LONG

Tabulka 14 - Parametry polarizačních jevů pro vzorek 160 WET LONG

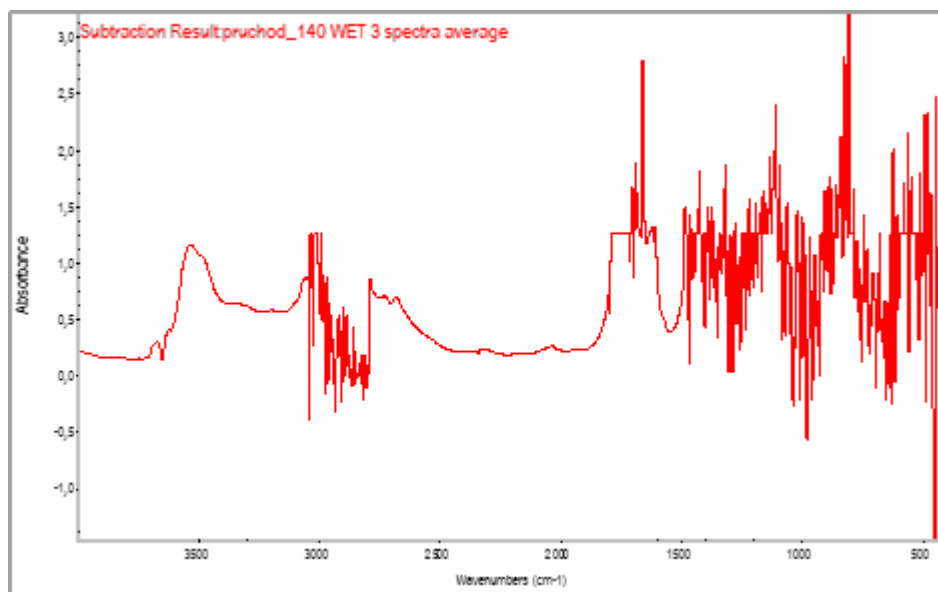
Fit	$\alpha$	$\beta$	$\epsilon_s$	$\epsilon_{inf}$
HN1	0,35	0,88	5,77	4,25
HN2	0,42	0,87	5,2	3,4
HN3	0,81	0,19	5,98	5,45

Na základě naměřených hodnot byla ve spolupráci s Ing. Pavlem Prosem, Ph.D. dodatečně provedena FTIR analýza, která měla za úkol zjistit přítomnost produktů jednotlivých degradačních procesů a tím potvrdit či vyvrátit dosavadní závěry. Analýza byla prováděna transmisí technikou pomocí přístroje FT-IR Nicolet 380 s měřicí celou Smart MIRacle. Měření bylo prováděno na vzorcích 140 LONG. Každý vzorek byl změřen ve třech spektrech, ta byla následně pomocí software OMNIC zprůměrována. Zprůměrované hodnoty jsou na zobrazeny na obrázku 39.



Obrázek 39 - Zprůměrované hodnoty FTIR analýzy.

Z grafu je vidět velký rozdíl mezi jednotlivými vzorky v oblasti okolo  $3500\text{ cm}^{-1}$  a  $2700\text{ cm}^{-1}$  až  $3000\text{ cm}^{-1}$ . Pro lepší vyhodnocení byl proveden odečet vzorků WET a DRY, výsledek je na obrázku 40. Velký rozdíl v oblasti  $3500\text{ cm}^{-1}$  naznačuje přítomnost alkoholů, které jsou produkty výše zmíněné hydrogenace.



Obrázek 40 - Rozdíl hodnoty vzorků WET a DRY.

## 5 Závěr

Hlavním tématem této diplomové práce byly elektroizolační kapaliny, především přírodní estery. Vzhledem k rostoucímu zájmu společnosti o ochranu životního prostředí jsou právě přírodní estery jednou z možných alternativ k minerálním olejům. Dalším tématem diplomové práce byly degradační procesy probíhající v celulóзовém papíru a přírodních esterech. S tím také souvisí provedený experiment, jehož cílem bylo zjistit vliv vlhkosti a teploty na elektroizolační systém papír – přírodní ester.

V první kapitole byly obecně popsány minerální oleje, rostlinné oleje a syntetické oleje. V kapitole byly popsány klady i zápory olejů, způsoby výroby, možnosti využití, na konci každé podkapitoly byly uvedeny příklady již vyráběných a prodávaných olejů. U minerálních olejů byla část kapitoly věnována i vlivu na lidské zdraví, s odkazem na Mezinárodní agenturu pro výzkum rakoviny, která shledává minerální oleje jako karcinogenní. V kapitole 1.2 byly popsány rostlinné oleje, v této kapitole byla část věnována postupu výroby rostlinných olejů a také důvodu, proč by mohly rostlinné oleje nahradit oleje minerální. Ve třetí části první kapitoly byly popsány syntetické oleje. Tato část je věnována především rozdělení syntetických olejů a vlastnostem různých druhů. Jako poslední v první kapitole byla popsána možnost využití elektroizolačních kapalin v budoucnosti. Lze předpokládat podobný trend jako při výrobě elektrické energie, a tedy snižování závislosti na fosilních palivech a zvyšování podílu obnovitelných zdrojů. Ty by v tomto případě mohly představovat právě přírodní estery, jejichž hlavní nevýhodou je neznalost jejich dlouhodobého chování a nedostatek norem popisujících provoz elektrických zařízení s přírodními estery.

Ve druhé kapitole byly popsány vybrané elektrické i neelektrické vlastnosti elektroizolačních kapalin. Výběr vlastností byl proveden s ohledem na produktové listy jednotlivých elektroizolačních kapalin, z těchto listů byly vybrány ty nejčastěji zmiňované vlastnosti. Elektrické vlastnosti popsány v této kapitole byly vnitřní rezistivita, elektrická pevnost, ztrátový činitel a relativní permitivita. Mezi neelektrické vlastnosti popsané v této kapitole patří vliv na životní prostředí viskozita, body tekutosti, vzplanutí a hoření. Dále parametry nazývané často jako ukazatele jakosti oleje a to barva, obsah vody a číslo kyselosti.

Třetí kapitola se zabývala degradačními procesy v elektroizolačním systému olej – papír. Pro lepší pochopení degradačních procesů je potřeba znát strukturu materiálu. Výroba a popis přírodních esterů byla popsána v kapitole 1.2. V kapitole 3 byla popsána výroba

papíru, chemické vazby a vlivy na jeho složení. Dále byly v kapitole popsány vnitřní a vnější faktory, které mohou být katalyzátory chemických reakcí a samotné degradační procesy. V případě celulóзовého papíru byly v kapitole popsány hlavní degradační procesy hydrolyza, oxidace, fotooxidace, fotolýza a síťování. V případě přírodních esterů jsou v literatuře jako hlavní degradační procesy uváděny hydrolyza, polymerace, oxidace a hydrogenace, a právě tyto chemické reakce byly v práci popsány. Nutno podotknout, že žádný z výše zmíněných dějů není izolovaný a všechny děje na sebe více či méně navazují či vzájemně působí.

Jak již bylo, zmíněno hlavní nevýhodou přírodních esterů je neznalost jejich dlouhodobého chování. Proto byl proveden experiment zrychleného stárnutí. Vzorky se skládaly ze 100 ml přírodního esteru ENVITRAFOL, transformátorové lepenky a plátku mědi, který měl v experimentu simulovat vinutí transformátoru. Experiment byl proveden na třech úrovních vlhkosti, která byla do vzorků vnesena různou vlhkostí transformátorové lepenky. A na třech úrovních teploty viz tabulka 10 - Teplota a doba expozice vzorků. Po expozici bylo u vzorků změřeno číslo kyselosti, obsah vody, ztrátový činitel a relativní permitivita.

Výsledkem experimentu bylo potvrzení či vyvrácení několika teoretických předpokladů. Prvním předpokladem byl vznik kyselé hydrolyzy, rozsah této chemické reakce měl být závislý na vlhkosti systému. To bylo potvrzeno měřením čísla kyselosti, které rostlo s vyšší počáteční vlhkostí. Druhým předpokladem byla teorie, podle které měl s vyšší počáteční vlhkostí růst ztrátový činitel a obsah vody po expozici. Ani ztrátový činitel ani obsah vody po expozici ale s vyšší počáteční vlhkostí nerostly a tento předpoklad nemohl být potvrzen. Z důvodu toho, že nebyla vidět žádná závislost mezi počáteční vlhkostí a obsahem vody po expozici, vznikla nová teorie, že při tepelné expozici v systému probíhá hydrogenace oleje, při které se spotřebovává voda a vznikají alkoholy. Z tohoto důvodu byla ve spolupráci s Katedrou technologií a měření provedena FTIR analýza, která u změřených vzorků vykazovala rozdíl v oblasti vlnové délky  $3500\text{ cm}^{-1}$ , tento rozdíl způsobuje právě přítomnost alkoholů, a to tedy potvrdilo teorii probíhající hydrogenace v oleji a snižování obsahu vody.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KUČEROVÁ, E. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-708-2940-0.
- [2] SKUPINA ČEZ. *OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne\\_zdoje\\_energie\\_a\\_moznosti\\_jejich\\_vyuziti\\_pro\\_cr.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf)
- [3] TOTZAUER, P. *Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [4] WEESMAA, J., WIKLUND P., PAHLAVANPOUR B., BERGELD L. a NUNES J. *Transformer oil specifications and important properties for optimal in-service life* [online]. 2014 [cit. 2018-27-10]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7035431>
- [5] TRNKA, P. a POLANSKÝ, R. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír* [online]. 2007 [cit. 2018-17-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/277097268\\_Tepelne\\_starnuti\\_izolacniho\\_system\\_u\\_olej-papir](https://www.researchgate.net/publication/277097268_Tepelne_starnuti_izolacniho_system_u_olej-papir)
- [6] PARAMO. *MOGUL TRAF0 CZ-A ISO VG 10* [online]. [cit. 2018-28-10]. Dostupné z: [https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti\\_trafo\\_cza\\_z5.pdf](https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_trafo_cza_z5.pdf)
- [7] CARGILL. *Envirotemp FR3 Fluid Brochure* [online]. [cit. 2018-28-10]. Dostupné z: <https://www.cargill.com/doc/1432076501275/envirotemp-fr3-brochure.pdf>
- [8] ABB. *BIOTEMP - Biodegradable Dielectric Insulating Fluid* [online]. [cit. 2018-28-10]. Dostupné z: <http://www.nttworldwide.com/docs/BIOTEMP-ABB.pdf>
- [9] M&I MATERIALS. *MIDEL-7131-Product-Brochure* [online]. [cit. 2018-18-11]. Dostupné z: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL-7131-Product-Brochure.pdf>
- [10] KALABZA, J. *Diagnostické metody pro hodnocení kapalných izolantů*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Pavel Prosr, Ph.D.
- [11] NATIONAL TOXICOLOGY PROGRAM, DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. *Report on Carcinogens* [online]. 2016 [cit. 2018-14-12]. Dostupné z: <https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/profiles/mineraloils.pdf>
- [12] IARC WORKING GROUP ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISK TO HUMANS. *MINERAL OILS, UNTREATED OR MILDLY TREATED* [online]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2012 [cit. 2018-14-12]. ISBN 978-92-832-0138-0. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304428/>
- [13] BLAŽEK, J. a RÁBL, V. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha:

- Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0619-2.
- [14] SEWARD, T.M., A.E. WILLIAMS-JONES a A.A. MIGDISOV. *The Chemistry of Metal Transport and Deposition by Ore-Forming Hydrothermal Fluids. Treatise on Geochemistry* [online]. Elsevier, 2014, 2014, , 29-57 [cit. 2019-28-10]. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01102-5. ISBN 9780080983004. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080959757011025>
- [15] NYNAS NAPHTHENICS. *Produktový list oleje Lyra X* [online]. In: . 2006 [cit. 2019-28-10]. Dostupné z: <https://www.trafocz.cz/distribuce-oleju-nynas.html>
- [16] KARAK, N. *Vegetable oil-based polymers: properties, processing and applications* [online]. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012 [cit. 2019-10-11]. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-085-7097-101. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857097101500033?via%3Dihub>
- [17] MOHAMMED, L., MAZOOD S., BAKRUTHEEN M., WILLJUICE M., IRUTHAYARAJAN J. a KARTHIK M.. *Studies on critical properties of vegetable oil based insulating fluids. 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)* [online]. IEEE, 2015, 2015, , 1-4 [cit. 2019-10-11]. DOI: 10.1109/INDICON.2015.7443438. ISBN 978-1-4673-7399-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7443438/>
- [18] SITORUS, B. H., BEROUAL A., SETIABUDY R. a BISMO S. *Pre-breakdown phenomena in new vegetable oil – based jatropha curcas seeds as substitute of mineral oil in high voltage equipment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2015, 22(5), 2442-2448 [cit. 2019-10-11]. DOI: 10.1109/TDEI.2015.005069. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7311016>
- [19] ŠIRŮČEK, M. *Zlepšování parametrů výkonových transformátorů*. Plzeň, 2013. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [20] FIKR, J. a KAHOVEC J.. *Názvosloví organické chemie*. 3. vyd. Olomouc: Rubico, 2008. ISBN 978-80-7346-088-4.
- [21] PILOTO-RODRÍGUEZ, R., E. A. MELO, L. GOYOS-PÉREZ a S. VERHELST. *Conversion of by-products from the vegetable oil industry into biodiesel and its use in internal combustion engines: a review. Brazilian Journal of Chemical Engineering* [online]. 2014, 31(2), 287-301 [cit. 2019-10-11]. DOI: 10.1590/0104-6632.20140312s00002763. ISSN 0104-6632.
- [22] DIVÍLEK, P. *Analýza reologických vlastností rostlinných olejů a jejich složek*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MARTIN FRK, Ph.D.
- [23] MARTINEZ-VEGA, J. *Dielectric Materials for Electrical Engineering* [online]. Toulouse, France: John Wiley, 2013 [cit. 2019-14-12]. ISBN 1118619781, 9781118619780. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=dEnru4j6euwC&dq=pcb+synthetic+liquid&hl=cs&sourc>

- e=gbs\_navlinks\_s
- [24] KAVALÍR, J. *Zhodnocení dopadu elektroizolačních kapalin na životní prostředí*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [25] RAPP, K. J. a LUKSICH J. *Application of Natural Ester Insulating Liquids in Power Transformers. My Transfo* [online]. 2014 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [https://www.envirotempfluids.com.cn/content/uploads/2013/10/Natural\\_Ester\\_Power\\_Transformers\\_My\\_Transfo\\_2014Final.pdf](https://www.envirotempfluids.com.cn/content/uploads/2013/10/Natural_Ester_Power_Transformers_My_Transfo_2014Final.pdf)
- [26] ONG, J. *Green Transformer for Data Centre Absolutely!* [online]. 2013 [cit. 2019-30-04]. Dostupné z: [http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/99ad595c32e0c2d9c12566e1000a4540/453a1c157acb876e48257ba900121f81/\\$FILE/04.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/99ad595c32e0c2d9c12566e1000a4540/453a1c157acb876e48257ba900121f81/$FILE/04.pdf)
- [27] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [28] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [29] MENTLÍK, V. *Diagnostika izolantů*. I. Plzeň: Ediční středisko VŠSE v Plzni, 1986.
- [30] ČSN EN 60156 (346716) *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [31] CORE Globe. *Dielectric strength of transformer oil* [online]. In: . [cit. 2019-21-10]. Dostupné z: <https://globecore.com/wp-content/uploads/uploads/2014/08/Dielectric-strength-.pdf>
- [32] KUBEŠ, J. *Nové elektroizolační kapaliny*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.
- [33] ČSN EN 60247 (346719) *Izolační kapaliny – Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele (tan delta) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Český normalizační institut, 2005.
- [34] HADJADJ, Y., FOFANA I., SABAU J. a BRIOSSO E.. *Assessing insulating oil degradation by means of turbidity and UV/VIS spectrophotometry measurements: treaties and international agreements registered or filed and recorded with the Secretariat of the United Nations. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2015, 1987, 22(5), 2653-2660 [cit. 2019-06-02]. DOI: 10.1109/TDEI.2015.005111. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7311041>
- [35] VISWANATH, D. S. a T. K. GHOSH. *Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data* [online]. Springer Science & Business Media, 2007 [cit. 2019-07-02]. ISBN 9781402054822. Dostupné z: [https://books.google.cz/books/about/Viscosity\\_of\\_Liquids.html?id=TD3TeErQD-](https://books.google.cz/books/about/Viscosity_of_Liquids.html?id=TD3TeErQD-)



- oC&redir\_esc=y
- [36] ČSN EN ISO 3104 (656216) *Kapalné ropné výrobky – Stanovení klimatické viskozity a výpočet dynamické viskozity*. Český normalizační institut, 1998.
- [37] HAMRICK, L. *Transformer Oil Sampling* [online]. [cit. 2019-14-02]. Dostupné z: [https://www.netaworld.org/sites/default/files/public/neta-journals/NWsu09\\_Hamrick.pdf](https://www.netaworld.org/sites/default/files/public/neta-journals/NWsu09_Hamrick.pdf)
- [38] RYCROFT, M. *Vegetable oil as insulating fluid for transformers* [online]. 2014 [cit. 2019-14-02]. Dostupné z: <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2014/04/energize-april-14-p-37-40.pdf>
- [39] OECD. *OECD GUIDELINE FOR TESTING OF CHEMICALS* [online]. 1992 [cit. 2019-14-02]. Dostupné z: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948209.pdf>
- [40] ALUYOR, E. *Biodegradation of Mineral Oils – A Review* [online]. 2009 [cit. 2019-14-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228618192\\_Biodegradation\\_of\\_Mineral\\_Oils\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/228618192_Biodegradation_of_Mineral_Oils_-_A_Review)
- [41] VÁVROVÁ, P. *Koroze a degradace papíru* [online]. In: . [cit. 2019-23-02]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6478984-3-4-koroze-a-degradace-papiru.html>
- [42] ĎUROVIČ, M. *Restaurování a konzervování archiválií a knih*. V Praze: Paseka, 2002. ISBN 80-7185-383-6.
- [43] HECZKOVÁ, K. *Studium interakce vybraných sacharidů s py.PS2Cl* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/d13gu/>. Diplomová práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce Prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
- [44] VAŇKOVÁ, T. *Bělení papíru archivních a knihovních sbírek světlem* [online]. Praha, 2003 [cit. 2019-22-03]. Dostupné z: [http://www.viks.sk/chk/diplomka\\_vankova.doc](http://www.viks.sk/chk/diplomka_vankova.doc). Diplomová práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Vedoucí práce Ing. Irena Kučerová.
- [45] ROUBAL, J. *ORGANICKÁ CHEMIE A BIOCHEMIE pro vyšší stupeň Gymnázia v Duchcově 2. díl* [online]. [cit. 2019-23-03]. Dostupné z: <http://www.chesapeake.cz/chemie/download/skripta/biochemie.pdf>
- [46] [Mojechemie.cz](http://www.mojechemie.cz) [online]. [cit. 2019-23-03]. Dostupné z: [https://www.mojechemie.cz/Organick%C3%A1\\_Chemie:Karboxylov%C3%A9\\_kyseliny\\_a\\_jejich\\_deriv%C3%A1ty#Kysel.C3.A1\\_hydrol.C3.BDza\\_ester.C5.AF](https://www.mojechemie.cz/Organick%C3%A1_Chemie:Karboxylov%C3%A9_kyseliny_a_jejich_deriv%C3%A1ty#Kysel.C3.A1_hydrol.C3.BDza_ester.C5.AF)
- [47] VELÍŠEK, J. a HAJŠLOVÁ J.. *Chemie potravin. Rozš. a přeprac. 3. vyd.* Tábor: OSSIS, 2009. ISBN 978-80-86659-15-2.
- [48] STOKLASA, K. *MAKROMOLEKULÁRNÍ CHEMIE I.* [online]. 2005 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/939/mod\\_resource/content/2/Skripta\\_MMCH\\_I.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/939/mod_resource/content/2/Skripta_MMCH_I.pdf)
- [49] JANG, E. S, JUNG M. Y. a David B. *Hydrogenation for Low Trans and High Conjugated Fatty Acids. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* [online]. 2005, 4(1),

- 22-30 [cit. 2019-30-04]. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2005.tb00069.x. ISSN 1541-4337. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1541-4337.2005.tb00069.x>
- [50] SMITH, M. *March's advanced organic chemistry: reactions, mechanisms, and structure* [online]. 7th Edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, [2013] [cit. 2019-30-03]. ISBN 04-704-6259-0. Dostupné z: <http://rushim.ru/books/mechanizms/march6ed.pdf>
- [51] ČEPS, a.s. *Tisková zpráva: Regulační transformátory jsou kompletní, dorazil i poslední z nich* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/aktuality/novinka/regulacni-transformatory-jsou-kompletni-dorazil-i-posledni-z-nich>
- [52] DIRAM. *Coulometer WTD s modulem KOH: Uživatelská příručka* [online]. In: . [cit. 2019-23-02]. Dostupné z: <http://www.diram.cz/wp-content/uploads/ManualWTD-KOH-201709.1cz.pdf>
- [53] HAEFELY, TEST AG. *Operating Instructions: 2830/2831 Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer* [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://update.haefely.com/CT2830/>
- [54] NOVOCONTROL, *Alpha-A. Advanced Frequency Response Analyzer For Smart Measurement Applications* [online]. In: . [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.novocontrol.de/brochures/Alpha-A.pdf>
- [55] HORNAK, J. *Interakce nehomogenního dielektrika s elektrickým polem*. Plzeň, 2018. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [56] TRNKA P., TOTZAUER P., MENTLIK V., HORNAK J., MICHAL O. a LEFFLER J. *Aging of Electrical Insulating System Based on Organic Ester. 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)* [online]. IEEE, 2018 [cit. 2019-30-04]. DOI: 10.1109/ICD.2018.8468516. ISBN 978-1-5386-6389-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8468516/>

## Přílohy

### Příloha A: Produktový list oleje ENVITRAFOL



FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI

RICE



VYSOKÁ ŠKOLA  
CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ  
V PRAZE

### Charakteristické vlastnosti

Parametr	Limitní hodnota ČSN EN 62770	ENVITRAFOL
Před testem oxidační stability		
Vzhled	Čirý, bez sedimentů a suspenzí	Spĺňuje
Viskozita při 100 °C	max. 15 mm <sup>2</sup> /s	8,26
Viskozita při 40 °C	max. 50 mm <sup>2</sup> /s	35,84
Bod tekutosti	max. -10 °C	-24
Obsah vody	max. 200 mg/kg	45,8
Hustota při 20 °C	max. 1,0 g/ml	0,915
Přeskokové napětí	min. 35 kV/2,5 mm	60,3
Zrátkový činiteľ 90 °C	max. 0,05	0,00358
Číslo kyselosti	max. 0,06 mg KOH/g	0,011
Korozivní síra / DBDS	nepřítomna / pod mezi stanovitelnosti	Nepřítomna
Aditiva - antioxidant DBPC	max. 5 % hm.	0,53
Aditiva celkem	max. 5 % hm.	pouze DBPC
Po testu oxidační stability		
Číslo kyselosti	max. 0,6 mg KOH/g	0,041
Viskozita při 40 °C	max. navýšení původní hodnoty o 30%	35,30
Zrátkový činiteľ 90 °C	max. 0,5	0,02157

**ENVITRAFOL** je plně biologicky odbouratelný elektroizolační olej určený pro distribuční transformátory hermetického typu. Splňuje požadavky normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“. Je plně retrofitní. Má vyšší odolnost proti hoření, neobsahuje korozivní síru. Elektroizolační parametry jsou uvedeny v tabulce. Obsahuje malé množství aditiv. Výhoda proti minerálním olejům není pouze v biologické odbouratelnosti, ale i v menší citlivosti průrazného napětí k obsahu vlhkosti. Výhoda proti používaným syntetickým esterům spočívá zejména v jeho příznivé ceně. Je vhodný zejména pro oblasti se zvýšenou ochranou životního prostředí - intravilány obcí, chráněná území.

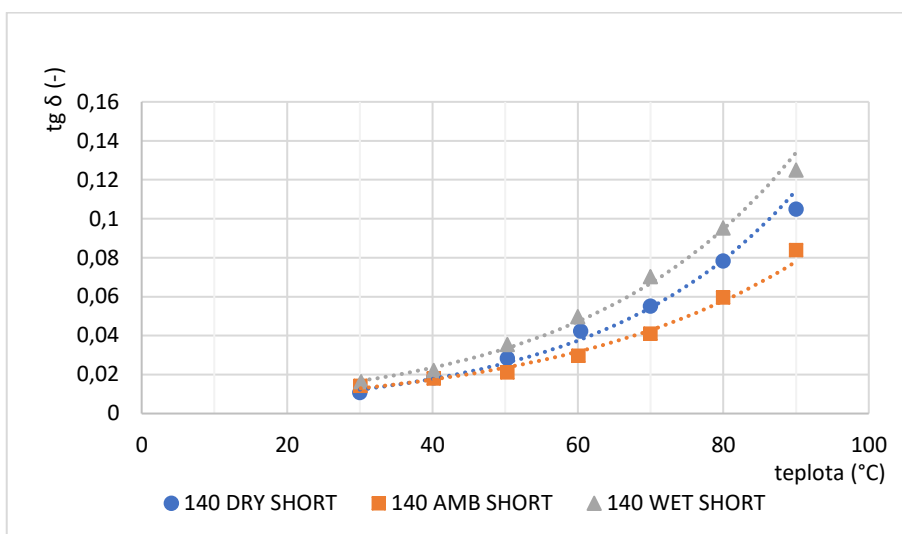
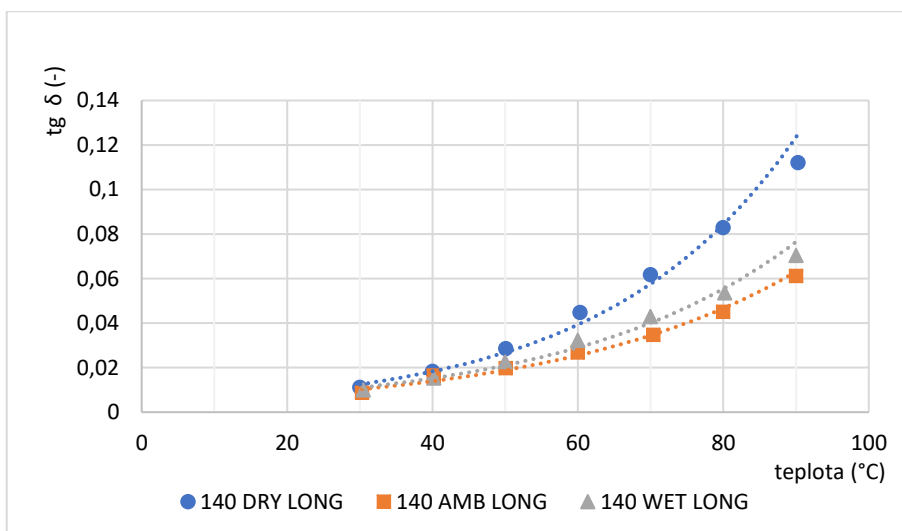
Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D, email:pavel@ket.zcu.cz, Tel: 420 377 634 518  
FEL RICE, ZČU v Plzni, Univerzitní 8, Plzeň, IČO 49777513, DIČ:CZ-49777513, ID DS: zqfj9hj

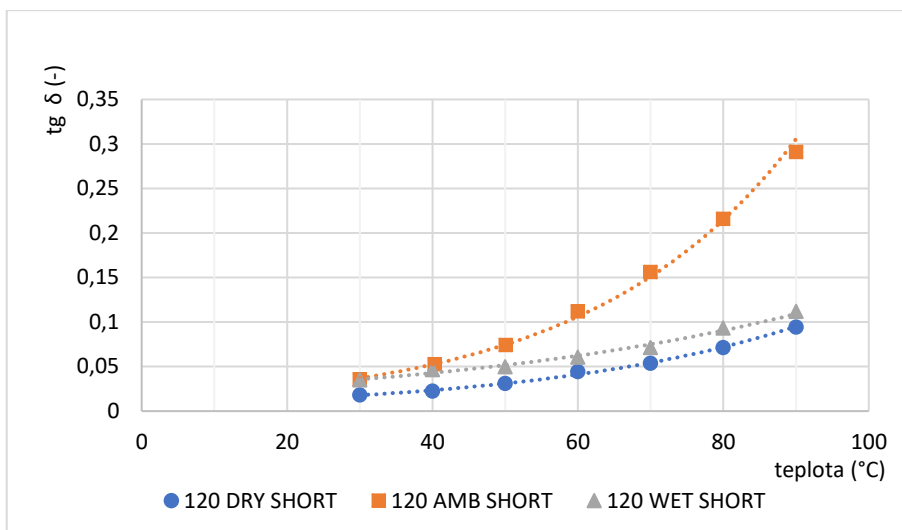
Obrázek p. 1- Produktový list rostlinného oleje ENVITRAFOL

**Příloha B: Naměřené hodnoty ztrátového činitele a relativní permitivity**Tabulka p. 1 - Naměřené hodnoty  $\operatorname{tg} \delta$  a  $\epsilon_r$  všech vzorků

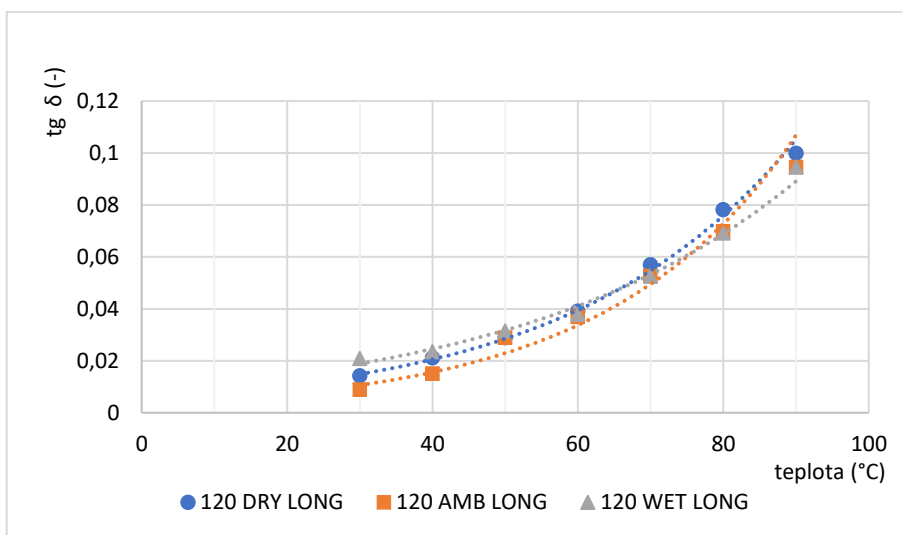
Druh vzorku	Teplota (°C)	$\operatorname{tg} \delta$ (-)	$\epsilon_r$ (-)	Druh vzorku	Teplota (°C)	$\operatorname{tg} \delta$ (-)	$\epsilon_r$ (-)
160 DRY SHORT	30,3	0,0116	2,884	160 DRY LONG	32	0,0191	2,764
160 DRY SHORT	40,2	0,0179	2,84	160 DRY LONG	40	0,0192	2,751
160 DRY SHORT	50	0,0233	2,778	160 DRY LONG	50,3	0,0305	2,705
160 DRY SHORT	60	0,0337	2,735	160 DRY LONG	60	0,0423	2,665
160 DRY SHORT	70	0,0466	2,685	160 DRY LONG	70	0,063	2,623
160 DRY SHORT	80,2	0,0686	2,637	160 DRY LONG	80	0,0854	2,585
160 DRY SHORT	90,3	0,0999	2,591	160 DRY LONG	90	0,118	2,549
160 AMB SHORT	30	0,0159	3,238	160 AMB LONG	30,2	0,0114	2,856
160 AMB SHORT	40,3	0,0249	3,145	160 AMB LONG	40	0,0184	2,812
160 AMB SHORT	50	0,0386	3,067	160 AMB LONG	50	0,0274	2,77
160 AMB SHORT	60	0,0502	2,986	160 AMB LONG	60	0,0389	2,726
160 AMB SHORT	70,2	0,0735	2,917	160 AMB LONG	70	0,0582	2,679
160 AMB SHORT	80,1	0,0983	2,859	160 AMB LONG	80	0,0757	2,658
160 AMB SHORT	90	0,134	2,811	160 AMB LONG	90	0,105	2,615
160 WET SHORT	30,3	0,016	2,986	160 WET LONG	30,3	0,014	2,883
160 WET SHORT	40	0,0219	2,932	160 WET LONG	40,1	0,0203	2,838
160 WET SHORT	50	0,0321	2,881	160 WET LONG	50	0,0316	2,772
160 WET SHORT	60,1	0,0486	2,786	160 WET LONG	60	0,0473	2,77
160 WET SHORT	70,1	0,0729	2,71	160 WET LONG	70	0,0651	2,768
160 WET SHORT	80	0,105	2,679	160 WET LONG	80	0,0939	2,753
160 WET SHORT	90,1	0,149	2,642	160 WET LONG	90	0,124	2,715
140 DRY SHORT	30	0,0108	2,777	140 DRY LONG	30	0,0111	2,838
140 DRY SHORT	40,2	0,0184	2,728	140 DRY LONG	40	0,0183	2,802
140 DRY SHORT	50,3	0,0283	2,68	140 DRY LONG	50,1	0,0285	2,769
140 DRY SHORT	60,4	0,0423	2,668	140 DRY LONG	60,3	0,0448	2,736
140 DRY SHORT	70	0,0552	2,637	140 DRY LONG	70	0,0617	2,707
140 DRY SHORT	80	0,0783	2,603	140 DRY LONG	80	0,0829	2,679
140 DRY SHORT	90	0,105	2,568	140 DRY LONG	90,3	0,112	2,653
140 AMB SHORT	30,1	0,0143	3,649	140 AMB LONG	30,3	0,00872	3,078
140 AMB SHORT	40,2	0,018	3,605	140 AMB LONG	40,2	0,0164	3,039
140 AMB SHORT	50,3	0,0212	3,55	140 AMB LONG	50,1	0,0197	2,998
140 AMB SHORT	60,1	0,0297	3,498	140 AMB LONG	60	0,0268	2,966
140 AMB SHORT	70	0,041	3,391	140 AMB LONG	70,4	0,0347	2,921
140 AMB SHORT	80	0,0596	3,306	140 AMB LONG	80	0,0451	2,867
140 AMB SHORT	90	0,0839	3,217	140 AMB LONG	90	0,0611	2,809
140 WET SHORT	30,2	0,0164	3,012	140 WET LONG	30,5	0,01	3,005
140 WET SHORT	40,2	0,0222	2,968	140 WET LONG	40,2	0,0153	2,974
140 WET SHORT	50,3	0,0355	2,914	140 WET LONG	50	0,0226	2,934
140 WET SHORT	60	0,0498	2,864	140 WET LONG	60	0,0322	2,884
140 WET SHORT	70	0,0703	2,813	140 WET LONG	70	0,0429	2,831
140 WET SHORT	80	0,0952	2,764	140 WET LONG	80,2	0,0535	2,778
140 WET SHORT	90	0,125	2,716	140 WET LONG	90	0,0703	2,73
120 DRY SHORT	30	0,018	1,65	120 DRY LONG	30	0,0142	2,985

120 DRY SHORT	40	0,0224	1,644	120 DRY LONG	40	0,0211	2,965
120 DRY SHORT	50	0,0309	1,628	120 DRY LONG	50	0,0289	2,908
120 DRY SHORT	60	0,0442	1,619	120 DRY LONG	60	0,0391	2,849
120 DRY SHORT	70	0,0538	1,61	120 DRY LONG	70	0,057	2,793
120 DRY SHORT	80	0,0712	1,567	120 DRY LONG	80	0,0781	2,739
120 DRY SHORT	90	0,0943	1,593	120 DRY LONG	90	0,0998	2,688
120 AMB SHORT	30	0,0359	4,418	120 AMB LONG	30	0,00889	2,756
120 AMB SHORT	40,3	0,0525	3,603	120 AMB LONG	40	0,015	2,711
120 AMB SHORT	50,1	0,0742	3,181	120 AMB LONG	50	0,0289	2,666
120 AMB SHORT	60	0,112	3,115	120 AMB LONG	60	0,0369	2,624
120 AMB SHORT	70	0,156	3,058	120 AMB LONG	70	0,0527	2,583
120 AMB SHORT	80	0,216	2,983	120 AMB LONG	80	0,0698	2,55
120 AMB SHORT	90	0,291	2,909	120 AMB LONG	90	0,0946	2,516
120 WET SHORT	30	0,035	2,928	120 WET LONG	30	0,0208	2,748
120 WET SHORT	40	0,0465	2,95	120 WET LONG	40	0,0234	2,705
120 WET SHORT	50	0,0497	2,927	120 WET LONG	50	0,0314	2,667
120 WET SHORT	60	0,0604	2,872	120 WET LONG	60	0,0379	2,627
120 WET SHORT	70	0,0715	2,805	120 WET LONG	70	0,0525	2,591
120 WET SHORT	80	0,0931	2,721	120 WET LONG	80	0,0692	2,558
120 WET SHORT	90	0,112	2,649	120 WET LONG	90	0,0945	2,524

**Příloha C: Grafy závislosti  $\text{tg } \delta$  na teplotě***Obrázek p. 2 - Závislost  $\text{tg } \delta$  oleje na teplotě pro vzorky 140 SHORT**Obrázek p. 3 - Závislost  $\text{tg } \delta$  oleje na teplotě pro vzorky 140 LONG*

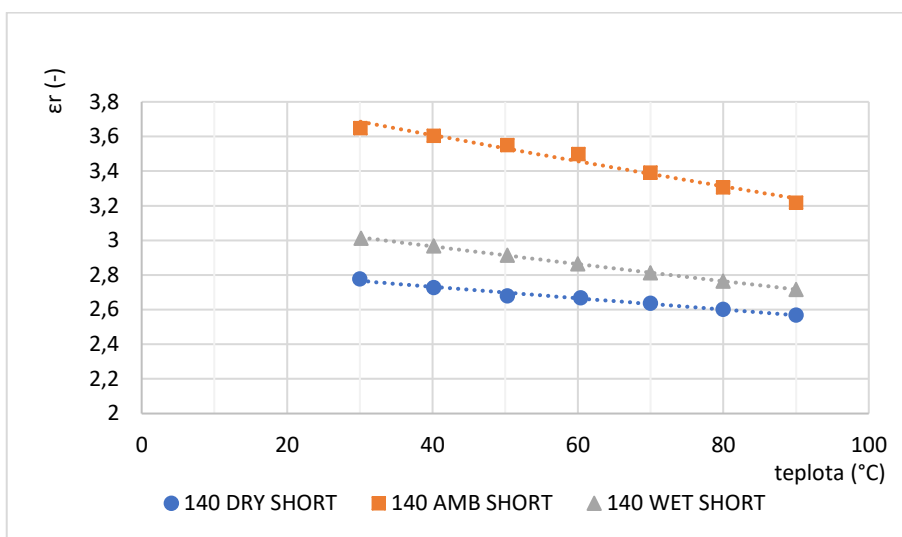


Obrázek p. 4 - Závislost tg δ oleje na teplotě pro vzorky 120 SHORT

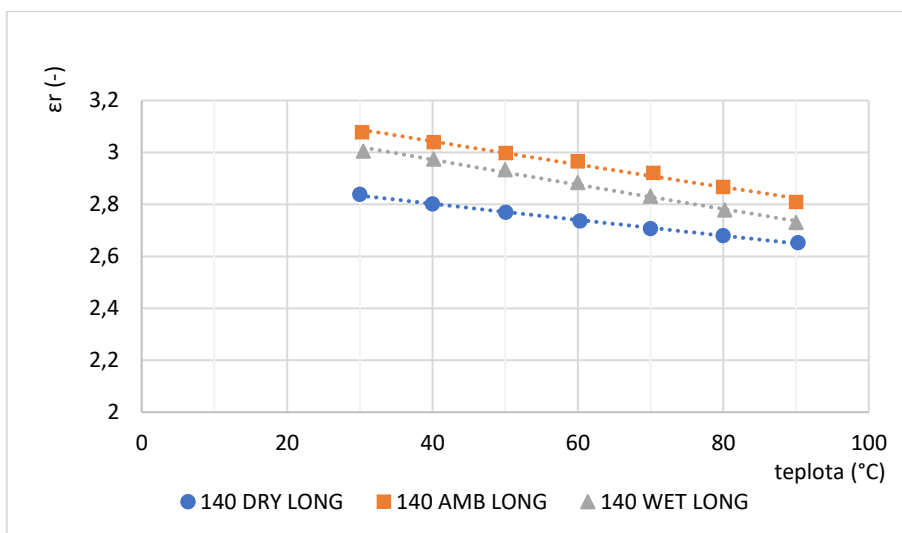


Obrázek p. 5 - Závislost tg δ oleje na teplotě pro vzorky 120 LONG

### Příloha D: Grafy závislosti $\epsilon_r$ na teplotě

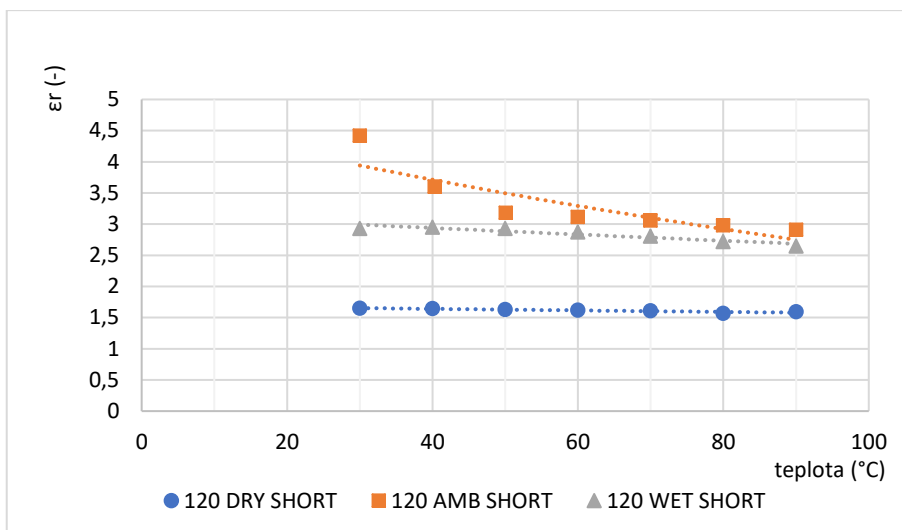


Obrázek p. 6 - Závislost  $\epsilon_r$  oleje na teplotě pro vzorky 140 SHORT

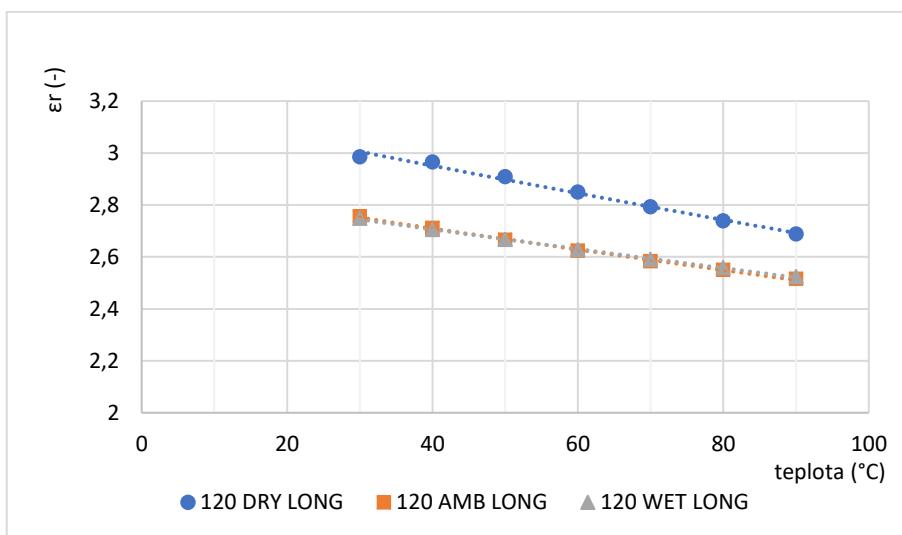


Obrázek p. 7 - Závislost  $\epsilon_r$  oleje na teplotě pro vzorky 140 LONG





Obrázek p. 8 - Závislost  $\epsilon_r$  oleje na teplotě pro vzorky 120 SHORT



Obrázek p. 9 - Závislost  $\epsilon_r$  oleje na teplotě pro vzorky 120 LONG