

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Pavel TOTZAUER

2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor

(ve zkratce Ph.D.) v oboru

Elektrotechnika

ASPEKTY POUŽÍVÁNÍ BIODEGRADABILNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN

Ing. Pavel TOTZAUER

Školitel: doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.

Datum SDZ: 29. listopadu 2018

Datum odevzdání: srpen 2019

2019

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Cílem předložené práce je přednesení možných cest ke zlepšení parametrů rostlinných olejů pro použití jako elektroizolační kapaliny. Sledované parametry byly vybrány vzhledem k jejich vlivu na dlouhodobou použitelnost rostlinného oleje v transformátorech.

Vlastní práce začíná přehledem vývoje, aktuálního stavu a moderních trendů v oblasti dielektrických kapalin. Hlavní část práce se zabývá provedenými experimenty, které se zaměřují na vliv elektrického namáhání, oxidační procesy a jejich omezení, interakci vody s rostlinným olejem a naposled vlivem nanočástic na esterovou kapalinu s důrazem na dlouhodobou použitelnost. Dosažené výsledky jsou konfrontovány s technickými normami, které stále prochází vývojem, a proto jsou dále navrženy úpravy některých limitních hodnot.

Závěrem je provedeno shrnutí předložené práce, zhodnocení získaných poznatků, a konfrontace dosažených výsledků s technickými normami, čímž je zaručena kompatibilita pro praktické použití.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rostlinný olej, řepkový, elektrické namáhání, oxidace, izolační systém, nanočástice, obsah vody, antioxidanty, limitní hodnoty

ABSTRACT AND KEYWORDS

The aim of this paper is to present possible ways to improve the parameters of vegetable oils for use as electroinsulating fluids. The monitored parameters were selected due to their influence on the long-term use of vegetable oil in transformers.

The thesis begins with history, current state and modern trends in the field of dielectric liquids. Main part deals with experimental work that is focused on influence of electrical degradation, oxidation and its limitation, interaction of water in ester oil and also the influence of nanoparticles in ester oil with focus on long term usability. Achieved results are confronted with technical standards that undergo some developments, which is why some modifications are presented.

In the end a summary of the work is presented, an evaluation of the acquired knowledge, and confrontation with technical standards which guarantee the compatibility for service deployment.

KEYWORDS

Vegetable oil, rapeseed, electrical degradation, oxidation, insulation system, nanoparticles, water content, antioxidants, limit values

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval školiteli doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady a připomínky. Dále Jaroslavu Bartoňovi za pomoc s realizací měření, a dále celému kolektivu pod vedením prof. Václava Mentlíka, CSc. za poskytnuté rady a věnovaný čas. Hlavní díky patří mé rodině a blízkým, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené odborné literatury a dalších zdrojů.

V Plzni, dne

Pavel Totzauer

OBSAH

Úvod a motivace pro řešení	1
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
1.1 Historický vývoj v oblasti elektroizolačních kapalin	2
1.2 Aktuální stav problematiky ve světě	4
1.3 Moderní trendy v oblasti dielektrických kapalin	11
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	13
Transformátor a jeho elektroizolační systém	15
3 TRANSFORMÁTOR	16
3.1 Konstrukční uspořádání	17
3.2 Diagnostika transformátorů	18
3.2.1 Role diagnostiky během technického života transformátoru	20
4 ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉM	25
4.1 Pevná část	25
4.2 Kapalná část	27
4.2.1 Minerální olej	28
4.2.2 Rostlinné oleje	32
Provedené experimenty	37
5 VLIV ELEKTRICKÉHO NAMÁHÁNÍ NA RYCHLOST DEGRADACE	38
5.1 Elektrické napětí jako degradační činitel	38
5.2 Popis měřicího zařízení, materiálů a metodiky	40

Obsah

5.3	Vyhodnocení experimentálního měření	42
6	ZPOMALENÍ OXIDAČNÍCH PROCESŮ V ROSTLINNÉM OLEJI	47
6.1	Oxidační procesy v oleji a jejich význam	47
6.2	Potlačení oxidačních procesů	49
6.3	Popis měřicího zařízení, materiálů a metodiky	50
6.4	Vyhodnocení experimentálního měření	54
7	VODA A JEJÍ INTERAKCE S ROSTLINNÝM OLEJEM	64
7.1	Voda v systému rostlinný olej-papír	64
7.1.1	Mechanismy chování vody a jejího vlivu	66
7.2	Popis měřicího zařízení, materiálů a metodiky	68
7.3	Vyhodnocení experimentálního měření	71
8	VLIV NANOČÁSTIC NA VLASTNOSTI ESTEROVÉ KAPALINY	77
8.1	Problematika použití nanočástic	77
8.2	Popis měřicího zařízení, materiálů a metodiky	79
8.3	Vyhodnocení experimentálního měření	82
	Zhodnocení, přínosy a závěr	91
9	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	92
9.1	Zhodnocení experimentálně dosažených výsledků	92
9.2	Doporučení plynoucí z dosažených výsledků	95
10	PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE	100
11	ZÁVĚR	102
	Literatura	104
	Publikace autora	115

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$tg\delta$	[–]	ztrátový činitel
ϵ_r	[–]	relativní permitivita
ϵ	[–]	reálná část komplexní permitivity
U_P	[kV/2.5mm]	přeskové napětí
ν	[cSt], též[mm^2s^{-1}]	viskozita
U_2	[kV]	výstupní napětí
CBM	condition based maintenance	údržba na základě stavu
TBM	time based maintenance	údržba na základě času
FWHM	Full Width at Half Minimum	šířka intervalu na polovině amplitudy
PSD	particle size distribution	distribuce dle velikosti částic
ppm	parts per million	částice na jeden milion
AC	střídavé napětí	
DC	stejnsměrné napětí	
EIS	elektroizolační systém	
TOS	test oxidační stability	
DGA	plynová chromatografie	
OFAF	oil-forced-air-forced	způsob chlazení s nuceným oběhem
OFAN	oil-forced-air-natural	způsob chlazení s kombinovaným oběhem
TiO_2	oxid titaničitý	
MgO	oxid hořečnatý	
SiO_2	oxid křemičitý	
ZnO	oxid zinečnatý	
NaOH	louh sodný	
BTHQ	butylhydroquinone	
BTHX	butylovaný hydroxyanisol	
CA	kyselina citronová	
PG	propyl gallate	

ÚVOD A MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ V OBLASTI ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN

HISTORICKÝ vývoj v oblasti elektroizolačních kapalin započal přibližně kolem roku 1890, kdy byl poprvé použit kapalný izolant v třífázových transformátorech firmy AEG. [1] Minerální olej plnil v elektroizolačním systému (EIS), stejně jako dnes, funkci izolačního i chladícího média. Jeho použití umožnilo navýšit výkon transformátorů, čehož se využívá dodnes.

Minerální olej prodělal od té doby určitý vývoj. Nejprve se používal olej na petrolejovém, a poté na parafinickém základě; oba však měly určité problémy s vlastnostmi, které byly značně založené na místě těžby zdrojové suroviny. Největším problémem byla vysoká teplota tuhnutí parafinu, která je v rozmezí 45 až 60 °C. Tyto a další nedostatky vyřešilo použití oleje na naftenickém základě, který se od jeho prvního použití hojně rozšířil a je používán dodnes. Typickými zástupci minerálních olejů jsou Shell Diala S3 [2] a Nynas Nytro Taurus [3], jejichž tabulkové hodnoty jsou uvedené v Tab. 1.

Tento minerální olej je v dnešní době snadno dostupný, levný a má výborné elektroizolační vlastnosti. V blízké době se však může stát problematickou dostupnost zdrojové suroviny - ropy. Dalším problémem je dnes často probíraná problematika ochrany životního prostředí, jelikož minerální oleje představují ve-

Tab. 1: Tabulkové hodnoty oleje Shell Diala S3 ZX-1 a Nynas Nytro Taurus [2]

bod vzplanutí [°C]	138	152
bod tekutosti [°C]	-60	-48
viskozita při 40, -30 °C [cSt]	8; 720	10; 1000
přeskokové napětí [kV/2.5mm]	>70	>70
ztrátový činitel $\text{tg } \delta$	0.001	0.080

likou hrozbu v případě kontaminace okolí. Zásadní je hlavně parametr biodegradability oleje v životním prostředí. Probíhá tak tedy zvýšený zájem o alternativní kapaliny, zde lze uvést syntetické oleje jako jsou např. silikonové oleje či syntetické estery. Jako náhrada za PCB oleje se již v 70. letech 20. století používal esterový olej založený na polyolech jejichž vlastnosti se velmi blížili olejům minerálním. [4] Použití našli hlavně v drážních transformátorech, a to ve Spojených státech, Evropě i Dálném východě.

Největšího zájmu se ale dostává rostlinným olejů, což jsou přírodní esterové oleje šetrné k životnímu prostředí, které lze vyrábět z lokálně dostupných surovin, což ve výsledku šetří náklady na výrobu. Většina jejich vlastností je na úrovni minerálních olejů - některé jsou lepší (bod vzplanutí, nepřítomnost síry, atd.), některé horší (ztrátový činitel, oxidační stabilita, a jiné), avšak výzkum prokázal, že jsou více než schopnou náhradou minerálních olejů, o čemž svědčí množství průmyslově vyráběných a úspěšně používaných transformátorových olejů jako je FR3, Midel eN 1204 a nejnověji Midel ICE, s vynikajícími vlastnostmi při nízkých teplotách, a Midel eN 1215, jehož zdrojovou surovinou je sója. [5] Esterové kapaliny dnes soustřeďují velký zájem v oblasti výzkumu, vývoje a praktického nasazení díky svému slibnému potenciálu.

1.2 AKTUÁLNÍ STAV PROBLEMATIKY VE SVĚTĚ

První zmínky o použitelnosti přírodních esterových kapalin¹ jako náhrady za transformátorový olej se ve vědecké literatuře objevily koncem minulého tisíciletí. [6, 7] Jejich hlavním záběrem bylo uvedení možnosti a prvních pokusů s rostlinnými oleji pro použití v transformátoru jako izolační kapaliny. [8,9] Hlavní výhodou rostlinných olejů byla od počátku biodegradabilita, díky níž je možné nasazení v oblastech s důrazem na ochranu životního prostředí (např. pobřežní oblasti [10]) a lepší požární odolnost v porovnání s oleji minerálními. [11] Dalším faktorem je vyrobiteľnosť z lokálně dostupných surovin, což se může projevit jako ekonomická výhoda. Nevýhodou je zde však nutnosť pozorného výberu oné zdrojové suroviny tak, aby měla vyhovující parametry.

Cesta k průmyslovému nasazení takovýchto olejů však nebyla jednoduchá. Rostlinné oleje, byť jsou plně vyhovující ze strany elektrických parametrů, jsou plny nedostatků a odlišností na straně fyzikální a chemické. Byl tedy potřeba důkladný výzkum, který by se s těmito nedostatky vyrovnal. Rozdílná je například **viskozita**, která ovlivňuje chladicí schopnost oleje a která je spojena s nízkoteplotními vlastnostmi oleje. [12] Zabýval se jí např. Viertel [13] cestou ovlivnění výsledné viskozity přimícháním různých příměsí na základě upravených mastných kyselin a polymerních řetězců. Tato cesta však vede k nepříznivému ovlivnění bodu vzplanutí při marginálním zlepšení viskozity. Lepší cestou ke změně viskozity je úprava samotného složení mastných kyselin - omezením obsahu triglyceridů oproti zvýšení monoesterů. [14] Porovnání chování dvou zástupců esterových kapalin s různou hodnotou viskozity - FR3 (8 cSt) a Nomex 970 FLD (4.6 cSt) na měření průrazného napětí potvrzuje, že vyšší viskozita "klasického" rostlin-

¹ vývojem a používáním jiných izolačních kapalin se tato práce nezabývala

ného oleje FR3 není z hlediska elektrických parametrů problematická. [15] Je tedy vhodnější zaměřit směr vývoje na jiná hlediska.

S viskozitou, a s obsahem mastných kyselin, je, jak bylo zmíněno, spojen **bod tekutosti**. Obsahem mastných kyselin a jejich významem se zabývá dále tato práce, zde to tedy nebude dále rozebíráno. Nízkoteplotní vlastnosti rostlinného oleje byly středem zájmu již od samého počátku uvažování jelikož minerální oleje mají v tomto směru vynikající vlastnosti (viz. Tab 1). Pro praktickou aplikaci má tento parametr zásadní důležitost, a vědecká literatura to reflektuje. [16] V praxi proběhly testy studených startů transformátorů s esterovými oleji o výkonu až 240 MVA, jako je např. FR3. [17] Při těchto testech se ukázala možnost použití stejné rozběhové procedury jako u transformátorů s minerálním olejem. Vyšší viskozita těchto olejů v blízkosti bodu tuhnutí se tedy neukázala jako problematická - nevyskytly se žádné problémy s přenosem nebo udržením tepla.

Z hlediska praktického nasazení je zásadní odlišná hodnota **permitivity** (zhruba o 40 %), která je u rostlinných olejů větší. Díky té se mění (oproti použití minerálního oleje, který má nízkou permitivitu - kolem 2.2) zatížení a namáhání jednotlivých částí transformátoru. Takováto změna má dopad na zvýšení průměrného namáhání, omezení oblastí maximálního namáhání ale také jejich výskyt v nových oblastech. To je nejlépe uvedeno na modelových a výpočtových simulacích za použití metody konečných prvků. [18] Zde autoři modelují transformátor s minerálním a rostlinným olejem. Ten má vliv i na použitou papírovou izolaci, která se daným olejem impregnuje, a je jím tedy ovlivněna pokaždé různě.

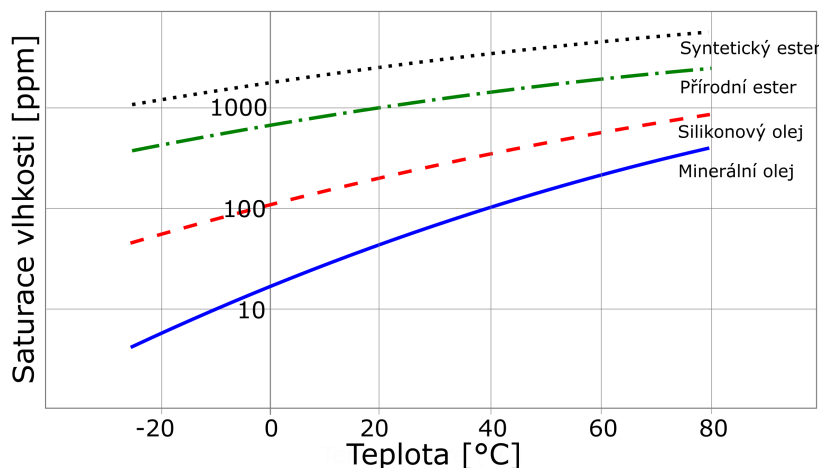
Rostlinný olej však nemá oblast použití jen v izolaci transformátoru, dá se použít i v průchodkách či vývodu průchodek. Takovéto prototypy již byly vyrobeny, otestovány (vyhověly jak po stránce napěťových zkoušek, tak z hlediska částečných výbojů, kdy aktivita byla <5 pF) a nasazeny v praxi. [19]

Další odlišností, a v tomto případě výhodou, je **možnost provozu za vyšší teploty** bez omezení životnosti. To reflektuje i IEEE standard pro testování distribučních transformátorů [20], který u přírodních esterů uvádí teplotní třídu 130. Zvýšené provozní teplotě však musí vyhovovat i jednotlivé části transformátoru a hlavně samotná izolace. Proto byly uskutečněny zátěžové testy, při kterých se přetížením dosahovalo zvýšených teplot. Po rozboru zařízení se však nenašly žádné části, které by byly nadměrně opotřebovány. [21]

Skutečně náročný a dlouhodobý provoz popisuje článek [22], ve kterém se pojednává o 12-letém nasazení transformátorů. Jedná se zde o použití přírodního esterového oleje s tepelně upravenou papírovou izolací v tepelné třídě 120, která při impregnaci v esterových olejích dosáhne třídy 140. To umožní použití vyšším teplotních limitů (průměrná hotspot teplota za dobu provozu byla 120 °C), a tím i posunutí výkonových limitů transformátoru. Díky tomu bylo umožněno navýšit výkon z původních 45 kVA (původně navrhovaný výkon s minerálním olejem) na 88 kVA pouze s malým zvětšením plochy radiátorů. Plánovaná životnost však zůstala stejná jako kdyby se jednalo o transformátor s minerálním olejem. Tento transformátor byl nasazen do vytíženého bodu distribuční sítě jako náhrada za transformátor o výkonu 112.5 kVA, a po 12 letech nepřetržitého provozu rozebrán a detailně analyzován. Výsledky ukázaly pouze minimální degradaci pevné a kapalné izolace.

S odlišnými parametry souvisí i další specialita rostlinných olejů, a to **obsah vody**. U minerálních olejů platí velice jednoduché pravidlo - kvalitní olej je suchý olej. Obsah vody je snižován na velice nízké hodnoty, kde 100 ppm již znamená špatný, nekvalitní olej na konci životnosti. Rozdílná je také celková saturace oleje, tedy kolik vody je schopen olej absorbovat. To je zapříčiněno obsahem esterových vazeb, potažmo polaritou kapaliny. Minerální olej je nepolární kapalina bez esterových vazeb; jeho saturace je tedy nízká (55 ppm). Oproti tomu esterové

oleje obsahují mnoho esterových vazeb, které jsou polární a jako takové přitahují vodu. Saturace přírodních esterových olejů je kolem 1100 (viz. Obr.1). [23]

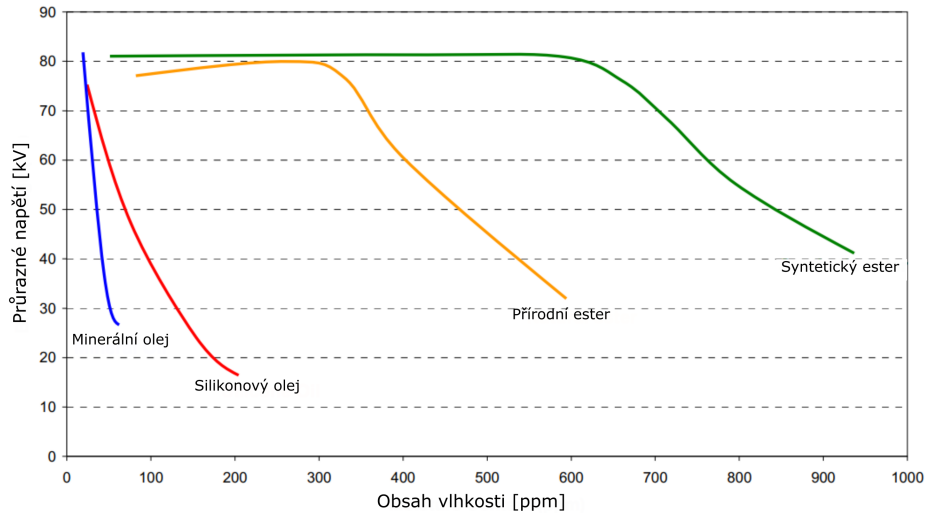


Obr. 1: Saturace vlhkosti různých typů oleje, převzato [23]

S rozdílným obsahem vody a saturace se mění i rovnováha v izolačním systému olej-papír. V systému s rostlinným olejem se více vody naváže v oleji, a pevná, papírová část izolace v sobě v této nové rovnováze váže méně vody než by tomu bylo s minerálním olejem. To ovlivní i další rozkladné reakce (obecně hydrolýzu a trans-esterifikaci celulózy) působící na papírovou část izolace jakož i rozkladné produkty (jako je voda, kterou do sebe naváže olej). [20, 24] Výsledkem je pak zlepšená životnost papírové části izolačního systému.

Samotné chování na papíře a tabulkové vlastnosti esterových olejů však nejsou jedinou podmínkou úspěchu. Je zde ještě jeden faktor, na kterém je potřeba zapracovat, a tím je člověk - uživatel/zákazník, který je zvyklý, že obsah vody má být naprosto minimální. Zde je však postaven před pravý opak. Příklad takového chování je na Obr.2, kde je ilustrováno průrazné napětí na olejích s různou vlhkostí. Obhájit toto odlišné chování před zákazníky je z hlediska výrobců

transformátorů jednou z hlavních překážek pro nasazování rostlinných olejů v transformátorech.



Obr. 2: Vliv vlhkosti na průrazné napětí, převzato [23]

Díky rozdílným vlastnostem a chování rostlinných olejů při provozu musíme použít jiné, nebo alespoň upravené, **limitní hodnoty diagnostických parametrů**. V této oblasti se postupně začínají objevovat normy a různá doporučení pro používání rostlinných olejů založená na vědeckých publikacích. Jsou tím například *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení* [25], dále *CIGRE brochure 436 - Experience in service with new insulating liquids* [23], *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Insulating Liquid in Transformers* [26] a *IEEE Standard for the Design, Testing, and Application of Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Using High-Temperature Insulation Systems and Operating at Elevated Temperatures* [20]. Většina těchto norem obecně popisuje požadavky na vlastnosti rostlinných olejů na základě požadavků pro minerální oleje, a to převážně jen v počátečním, tedy nepoužitém, stavu. Některé

se i zabývají významem různých diagnostických metod pro tyto kapaliny. Žádná však nedoporučuje limitní parametry v běžném provozu. Další otázkou je pak přebírání norem, jelikož většina z nich je v anglickém jazyce.

Diagnostické metody a jejich parametry zůstávají pro esterové oleje shodné, změnit se však musí limitní a vyhodnocovací hodnoty. Oblíbenou diagnostickou metodou je například analýza rozpuštěných plynů v oleji - DGA. Tato metoda platí za validní indikátor předporuchových a poruchových stavů na základě chemické analýzy odebíraného oleje. V každém oleji při degradačních procesech probíhají chemické reakce jejichž výsledkem jsou plynné produkty. Ty se samozřejmě liší dle druhu oleje, tedy v případě esterových olejů jsou zcela odlišné než je tomu u oleje minerálního. Toto alespoň částečně reflektuje několik autorů [27], hlavně M. Duval [28], tvůrce diagnostické metodiky pro analýzu DGA - Duvalových trojúhelníků. Ten uvádí několik příkladů z nasazení alternativních olejů BioTemp a FR3, na základě kterých základní metodiku pro minerální oleje upravil pro použití s přírodními estery. Problémem je však nedostatek dat z provozu z důvodu jejich relativně krátkého nasazení.

Poznatky z několikaletého nasazení rostlinného oleje jako **retrofitu** spolu s analýzou DGA přináší autoři v článku *DGA of Natural Ester Filled Transformers* [29]. Zmíněné transformátory byly před retrofitem v provozu nejméně 10 let. Pevná část izolace tedy byla značně navlhla, a tedy v ideálním stavu pro nasazení rostlinného oleje. Jeho použití zaručí vysušení izolace převedením vody do oleje, který má, jak již bylo řečeno výše, vyšší saturační hodnoty. Z počátečního stavu 50 ppm došlo ke změně na nový ustálený stav 300 ppm během prvního roku provozu. Nejdůležitějším jevem v tomto procesu je hydrolýza, která se bude dále podílet na zvýšení čísla kyselosti olejové náplně. Vlastní analýza DGA byla

prováděna každý měsíc provozu, avšak podle staré metodiky; v této části tedy nedošlo k výraznému výsledku.

Důvodů k retrofitu, tedy nahrazení původní minerální náplně transformátoru olejem jiného druhu bez dodatečné úpravy, je několik. Tím prvním je finanční úspora, a to jako na pořizovacích nákladech, tak na těch provozních. Esterové oleje lze totiž provozovat při stejném zatížení na vyšších teplotách, což se pozitivně projeví na prodloužení životnosti celého transformátoru. Dalšími důvody k nasazení esterových olejů mohou být enviromentální důvody (nasazení v městské či přírodně chráněné oblasti), kdy se nemusíme obávat poškození životního prostředí díky vysoké biodegradabilitě těchto olejů. Lepší jsou také z hlediska požární odolnosti.

Příkladů praktického nasazení uvádí hlavní výrobci průmyslově vyráběných zástupců esterových olejů (M& I Materials [30] a Cargill [31]) mnoho. Například Cargill uvádí přes jeden milion nasazených transformátorů s oleji FR3. M& I Materials pak nasazení škály olejů Midel dokládá v mnoha různých oblastech zahrnujících výkonové a distribuční transformátory, transformátory u obnovitelných zdrojů energie (např. pobřežní stanice větrných farem), na lodích, podzemních stanicích a v mnoha dalších oblastech.

Poslední poznámka se bude týkat dalšího aspektu spojeného s životním cyklem transformátorového oleje, a to jeho filtrací a regenerací. Ta může probíhat stejnými prostředky - IEEE C57.147-2018 [26] však upozorňuje na možné riziko odfiltrování určitých žádoucích antioxidantů z kapaliny, což by výrazně kompromitovalo životnost. Je tedy potřeba brát na zřetel i tato specifika.

1.3 MODERNÍ TRENDY V OBLASTI DIELEKTRICKÝCH KAPALIN

Výše uvedené fakty dokládají trend nahrazovat dnes již nevyhovující minerální olej, nebo alespoň omezovat jeho použití. Nástupnické kapaliny se řadí do kategorie esterů, a to jak přírodního, tak syntetického původu. Vlastnosti přírodních esterů jsou tak rozmanité, jako jejich zdrojové rostliny. Některé druhy se pro elektrotechnické využití přirozeně nehodí (např. palmový olej), jiné (např. řepkový, slunečnicový, sojový olej) jsou však slibné. [23] I tyto zástupci však mají určité nedostatky, se kterými je třeba se potýkat. Průmyslová výroba a nasazení těchto alternativních kapalin však ukázala, že v určitých oblastech je jejich použití benefiční jak z technického, tak ekonomického hlediska. [32]

Značná část výsledných vlastností esterové kapaliny závisí na složení jejích mastných kyselin. První cestou ke kapalině s vylepšenými vlastnostmi jsou tedy přirozeně různé mixy olejů [9, 33, 34], a to ať esterových mezi sebou, ale i směsi esterový/minerální olej. Důležité je však klást si otázku cílového určení výsledné směsi. Výsledná směs s minerálním olejem přirozeně ztratí výhody přírodních olejů, jako je biodegradabilita a vysoký bod vzplanutí, avšak tímto přídavkem nezíská výrazné zlepšení svých elektroizolačních vlastností.

Dalším přístupem je přidání různých příměsí, které například zpomalují chemické procesy v oleji. To se těsně dotýká rostlinných olejů, které jsou náchylné k oxidaci, kde přidání antioxidantů zlepšuje dlouhodobou stabilitu parametrů oleje. [35] Tento chemický přístup se zakládá na znalosti zastoupení mastných kyselin v oleji a chemických reakcích mezi nimi. [36]

Nejnovějším trendem je pak přidávání nanočástic s cílem zlepšit elektroizolační vlastnosti. Nejčastěji se jedná o oxidy kovů (např. TiO_2 , SiO_2 či ZnO) s různým stupněm vodivosti. Tento postup se ukazuje jako úspěšný, a to jak u minerálního [37], tak rostlinných olejů [38]. Speciálním případem je pak pou-

žití magnetických nanočástic, kdy se výsledná kapalina nazývá ferrokapalinou (ferrofluid) [39]. Tento postup se zatím aplikoval pouze pro minerální oleje. Aplikace nanočástic však neřeší všechny problémy. Sama o sobě je problematická aglomerace a sedimentace částic, tedy řeší se dlouhodobá stabilita takovéto nanokapaliny. Základem je vybrat vhodnou kombinaci nanočástic, jejich velikosti, druhu oleje, a vhodné povrchové úpravy zabraňující negativním výše popsaným jevům. Jedině tímto komplexním přístupem lze dosáhnout dlouhodobě použitelné elektroizolační kapaliny.

Vývoj komplexní izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí tedy skýtá ještě mnoho výzev a problematik k objasnění.

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

OBLAST elektroizolačních kapalin prochází v posledních letech značným vývojem. Běžně používané minerální oleje přestávají dostačovat novým požadavkům jako je např. biodegradabilita. Do popředí zájmu se dostávají oleje šetrné k životnímu prostředí – přírodní estery vyráběné z lokálně dostupných rostlin. Vyvstává zde však otázka jejich dlouhodobé použitelnosti kvůli odlišnému složení, stejně jako odlišný vliv dalších provozních faktorů. Spolu s novým druhem elektroizolační kapaliny jsou dalším faktorem nové inovační možnosti, jejichž cílem je zlepšení parametrů.

Cíle práce také reflektují vývoj elektroizolační kapaliny na bázi řepkového oleje, který byl prováděn na autorském pracovišti v předchozích letech, a na který tato práce navazuje.

Z výše uvedeného přehledu aktuální problematiky a trendů plynou mnohé aspekty, které ovlivňují používání biodegradabilní elektroizolační kapaliny. Na ty se zaměří tato disertační práce, jejímž cílem je výzkum a zhodnocení problematických parametrů nových elektroizolačních kapalin, a to konkrétně:

- Vymezení vhodné kapaliny na bázi rostlinných olejů na základě studia vlivu elektrického namáhání

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Studium chemického složení vhodného oleje a návrh experimentu, jehož cílem je zpomalení degradačních procesů v takovém oleji
- Experimentální zhodnocení interakce vlhkosti s elektroizolačním systémem olej-papír a jeho dopadu na provozní parametry
- Výzkum vlivu povrchové úpravy nanočástic na vlastnosti výsledné nanokapaliny
- Stanovení reálné distribuce nanočástic v elektroizolační kapalině
- Rozbor dlouhodobého rozložení nanočástic v esterové nanokapalině
- Návrh vhodných limitních diagnostických a provozních parametrů pro použité rostlinné oleje na základě provedených experimentů
- Vytvoření zásad provozování a použití esterových olejů, a esterových olejů s nanosložkou na základě analýzy získaných dat

TRANSFORMÁTOR A JEHO ELEKTROIZOLAČNÍ
SYSTÉM

TRANSFORMÁTOR

TRANSFORMÁTORY jsou netočivé elektrické stroje, kde se ve výstupním vinutí indukuje elektrické napětí U_2 časovou změnou magnetického toku. Nejčastěji bývají jednofázové nebo třífázové; tvořeny jsou magnetickým a elektrickým obvodem. Magnetický obvod je tvořen feromagnetickým materiálem, elektrický obvod představuje vinutí. Používají se v distribuční síti ke zvyšování a snižování hladin napětí.

Vývoj transformátoru započal na konci 19. století, první zdokumentovaný uzavřený jádrový jedno fázový transformátor s železným vinutím byl postaven v roce 1884 v Budapešti firmou GANZ. Jeho výkon byl 1400 Wattů, napěťové poměry 120/72 V. První třífázový transformátor se datuje do roku 1890, kdy byl vyvinut německou firmou AEG. Téhož roku byl také poprvé použit olej jako izolační médium. [41] Od tohoto momentu, kdy použití systému olej-papír umožnilo navyšovat výkon až do dnešních dob, byl další vývoj transformátoru, dalo by se říci, pouze otázkou času a vhodných materiálů.

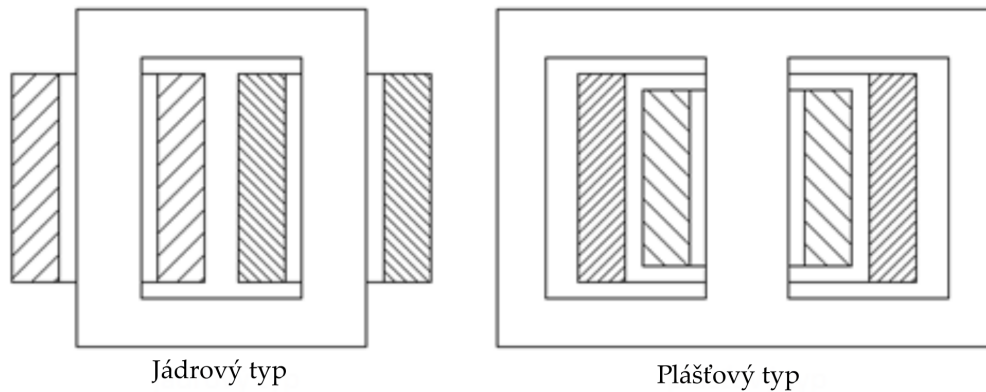


Obr. 3: Třífázový autotransformátor 350 MVA, převzato [40]

3.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Nejrozšířenějším druhem je transformátor olejový. Sestává se z magnetického obvodu, vinutí a chladicího systému, kde je magnetický obvod s vinutím ponořen v oleji, který funguje zároveň jako izolační a chladicí médium. Dalšími částmi transformátoru jsou průchodky, přepínače odboček, vývody vinutí, chladiče, konzervátor, radiátory atd.

Magnetickým obvodem protéká žádoucí magnetický tok, skládá se z navzájem odizolovaných elektrotechnických plechů o tloušťce 0.35 nebo 0.5 mm. Používají se plechy izotropní i anizotropní, kde anizotropní mohou být výhodně orientovány ve směru magnetického toku. Podle uspořádání magnetického obvodu je transformátor buď jádrového nebo plášťového typu, jak ilustruje Obr. 4 [42].



Obr. 4: Uspořádání magnetických obvodů

Další částí je vinutí, které je navinuto na magnetickém jádře. Vinutí je z měděných, případně hliníkových, vodičů kruhového nebo čtvercového průřezu vinuto polohovým nebo kotoučovým způsobem. Jejich další rozložení záleží na vlastním provedení stroje, počtu fází, uspořádání chladících kanálů atd.

Izolaci v transformátoru lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní izolace je izolace cívk, tedy mezi závity, polohami, cívkami atd. Používá se izolace teplotní třídy A (105 °C), materiály většinou organického původu jako papír, bavlna, hedvábí. Tato vnitřní izolace je ponořena, a tedy impregnována, v izolaci vnější. Ta představuje izolaci mezi vstupním a výstupním vinutím, mezi cívkami a železem a mezi fázemi. Jako izolační materiál se používá olej (nejčastěji minerální); v případě suchých transformátorů vzduch či zalévací hmota (převážně epoxidové pryskyřice).

3.2 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ

Elektrotechnická diagnostika je důležitým nástrojem, který ovlivňuje výslednou životnost elektrických strojů. Díky ní jsme pomoci monitorování daných para-

metrů schopni podchytit blížící se havarijní stavy a vyvarovat se jich. Diagnostická měření u transformátorů se provádí offline nebo online metodikou. Každá z nich skýtá určité výhody. Offline měření poskytují přesnější data, avšak odběr vzorků je při provozu problematický či dokonce nemožný. Do této kategorie patří všechny zkoušky, které stroj podstupuje ve výrobě, při odstávkách a havarijních stavech. Jejich souhrn a požadavky na ně jsou uvedeny v normě ČSN EN 60076. [43] Oproti tomu online diagnostika nezasahuje do provozu stroje, s jejím použitím se však musí počítat již při jeho návrhu kvůli umístění měřicích senzorů. Její výhodou je redukce nákladů díky monitoringu kritických veličin, ustanovení historické databáze vývoje sledovaných veličin a na jejím základě predikování nadcházejících poruch a jejich předejití. Nevýhodou je však kratší životnost systému, velké množství falešných hlášení a náklady na údržbu monitorovacího systému. [44]

Diagnostické metody se u transformátorů odlišují také podle diagnostikovaného objektu. Buď se diagnostikuje daná funkční část transformátoru (např. přepínač odboček) nebo se pro zdroj diagnostické informace využije olej, který je v transformátoru nositelem informace o stavu jednotlivých prvků (čehož se využívá při provozních měřeních).

Nejčastěji používanými diagnostickými metodami jsou měření teplot, a to ať teploty venkovní, teploty vrchní vrstvy oleje nebo hot-spot teploty. Dále pak měření napětí a proudů měřícími transformátory na průchodkách. Ty nám dodávají informace o aktuálním zatížení transformátoru, z čehož vyplývá velikost Jouleových ztrát a potažmo zvýšené teploty, která působí jako degradační faktor. Dalším degradačním faktorem je vlhkost, která se monitoruje kapacitními senzory. Monitoruje se také obsah plynů pomocí senzorů na elektrochemickém základě. Bližší informace nám může dále poskytnout analýza plynů rozpuštěných v oleji pomocí plynové chromatografie (DGA). Pro odhalení možných poruch se dále

využívá měření částečných výbojů, které je cenným zdrojem informací o možné poruše a případně i její lokaci. Měření může probíhat jak metodami elektrickými (galvanickou globální metodou), tak neelektrickými (metody optické nebo akustické). [45]

Dále se provádí dielektrické zkoušky dle ČSN EN 60076-3 ed.2 [46], které v sobě zahrnují elektrickou pevnost izolačních prvků, ztrátový činitel $\tan \delta$, měření izolačních odporů a polarizačních indexů. Dále pak diagnostická měření oleje jako jeho vnitřní rezistivita, průrazné napětí, obsah vody, číslo kyselosti, relativní permitivita ϵ_r , viskozita a jiné.

3.2.1 *Role diagnostiky během technického života transformátoru*

Transformátor za svého života podstupuje mnoho diagnostických měření majících za úkol ověřit jeho správnou funkčnost. Toto začíná při výrobě, kdy již samotné materiály podstupují vstupní kontrolu. Již během výroby samotných součástí transformátoru probíhají mezioperační zkoušky. Na konci výroby poté čekají na celý transformátor zkoušky typové, kusové a zvláštní, které mají za cíl ověřit funkční vlastnosti vyrobeného celku. Typovou zkoušku podstupuje jeden kus z nové řady, kdy byla provedena zásadní konstrukční změna, která by mohla ovlivnit jeho vlastnosti. Kusovou zkoušku podstupuje každý vyrobený transformátor v rozsahu stanoveném výrobcem a normami. Zvláštní zkouška se pak týká transformátorů a zkoušek nad standartní rámec dle přání zákazníka. Přehled prováděných zkoušek je možné získat z Tab. 2. [45]

Další skupinou diagnostických měření, které transformátor podstupuje, jsou servisní a provozní měření. Jak je již z názvu vypovídající, tyto měření probíhají v době provozu transformátoru. Provozní měření mají za cíl sledovat pomocí měřených parametrů stav stroje a odhalovat blížící se poruchy. Do této kategorie

Tab. 2: Seznam diagnostických zkoušek [45]

Název zkoušky	Zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	•	•	
Měření odporu vinutí za studena ss proudem	•	•	
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	•	•	
Kontrola natočení fází	•	•	•
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	•	•	
Zkouška indukovaným napětím	•	•	
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	•	•	
Měření charakteristiky naprázdno	•		
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	•	•	
Oteplovací zkouška	•		
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým pulsem do 132 kV	•		
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým pulsem nad 132 kV	•	•	
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru s <110 kV			•
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru s >110 kV	•	•	
Zkratová zkouška	•		
Měření hluku na transformátorech do 1600 kVA	•		
Zkouška přepínače odboček	•	•	
Měření částečných výbojů			•
Zkouška oleje	•	•	

patří například měření teplot, napětí a proudu na průchodkách a jiné. Druhou skupinou jsou pak servisní měření. Ta probíhají ve dvou případech, a to při pravidelných servisních intervalech, nebo v případě poruchy.

Během provozu transformátoru se v pravidelných intervalech provádí vizuální kontrola. Ta je prvotním a nejjednodušším diagnostickým prostředkem. Jejím předmětem je [47]:

- kontrola hluku transformátoru a jeho odlišností od normálu

- kontrola průchodek - jejich opálení, znečištění, jiskření apod.
- kontrola hladiny oleje v konzervátoru
- odečty teplot a zjištění možných velkých odchylek mezi sebou
- stav vysoušeče
- stav bezpečnostního tlakového ventilu
- stopy oleje

Z provozních měření jsou nejčastější monitorování zátěže transformátoru a jeho teploty. Obě tyto veličiny jsou spolu provázané, jelikož velikost zátěže ovlivňuje velikost ztrát, které zvyšují teplotu celého stroje. U provozních měření, tedy online monitoringu, je důležité zajistit vysokou spolehlivost a odolnost měřicích senzorů. V opačném případě by celý monitoring ztratil smysl.

Samostatnou skupinou je poslední druh diagnostiky, a to servisní měření. Ty se provádí buď v pravidelných intervalech na základě TBM (time based maintenance) nebo CBM (condition based maintenance), tedy dle momentálního stavu; jejich cílem je předejít poruchovým stavům. Dále se servisní měření provádí po opravě transformátoru.

Postup diagnostických měření právě při takových servisních odstávkách je dle provozních návodů k transformátorům [47,48] následující:

- Každý rok - kontroluje se stav trafostanice, její znečištěnost, poškození, opálení, nadměrný hluk, těsnost nádoby a stav oleje, jehož se odebere vzorek pro další měření, dále pak uzemnění stroje a stav průchodek.
- Každých 3-5 let (dle jednotlivého stroje) - tyto periodické zkoušky obsahují vizuální kontrolu, měření izolačního odporu a odporu vinutí, měření

převodu, funkce přepínače odboček a zkoušky oleje, které v sobě zahrnují zjištění obsahu vody, analýzu rozpuštěných plynů, velikost průrazného napětí, ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, měrný odpor a barvy oleje.

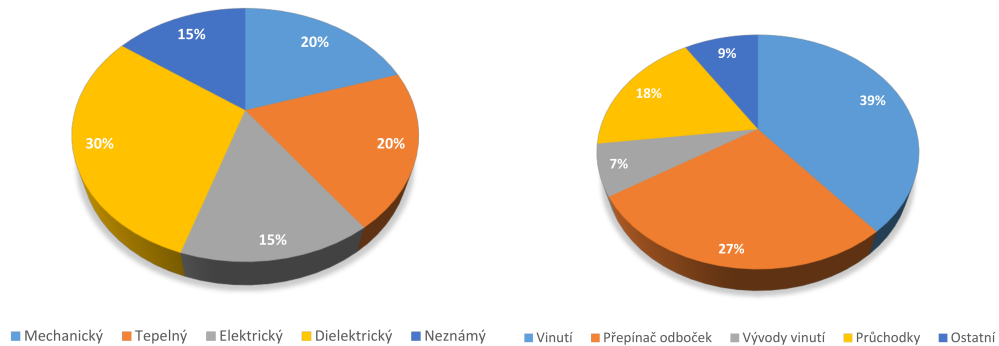
Při provádění diagnostických měření se musí brát v úvahu rozměry stroje a cíl diagnostiky. Pro měření při provozu s požadavkem na minimální výpadek se servisní měření provádění v místě provozu transformátoru pomocí diagnostických vozidel vybavených pro tyto účely měřicí technikou a vlastními zdroji. Tímto způsobem lze snadno provést požadovaná měření s minimální odstávkou. Tento způsob diagnostiky blíže popisuje ve svém dokumentu výrobce diagnostických měřidel Megger [49].

Nejčastější výskyt poruch

Transformátory, jakožto klíčové prvky v distribuční síti, plní nezastupitelnou roli v celé energetické síti. Jejich údržbě je pro jejich důležitost věnována značná pozornost, i tak se však vyskytují poruchy vynucující si odstávku transformátoru a jeho opravu či dokonce vyřazení. Poruchovost transformátorů je přibližně 0.5 % [50]. Z důvodu pořizovací ceny a doby na výrobu stroje se upřednostňuje jeho oprava před vyřazením; z hlediska závažnosti poruchy je rozdělení přibližně následující - 1/3 strojů se sešrotuje, 1/3 podstoupí opravu u výrobce a 1/3 se opraví na místě. [44] Dle studie Cigre A2.37 [50] se nejčastěji vyskytují poruchy, a to celkem 84 % všech zaznamenaných poruch, na vinutí, přepínačích odboček a průchodkách, viz následující Obr. 5.

Je třeba vzít v potaz, že tato data zahrnují jak blokové (zvyšující), tak síťové (snižující) transformátory, a tedy že reálné zastoupení poruch se liší podle typu transformátoru a také jeho napěťové úrovni - u síťových transformátorů je, pro

3 TRANSFORMÁTOR



Obr. 5: Zdroje a lokace závad [50]

příklad, větší množství poruch na přepínačích odboček než u blokových transformátorů atd. Lze však říci, že největší množství poruch má původ ve stárnutí a procesech s ním spojených - zvýšené teploty, částečných výbojů, zvýšené rychlosti degradaci dielektrika. Těmito procesy je samozřejmě nejvíce postiženo vinutí transformátoru, na kterém poté snáze dochází ke zkratům díky zeslabené izolační vrstvě.

ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉM

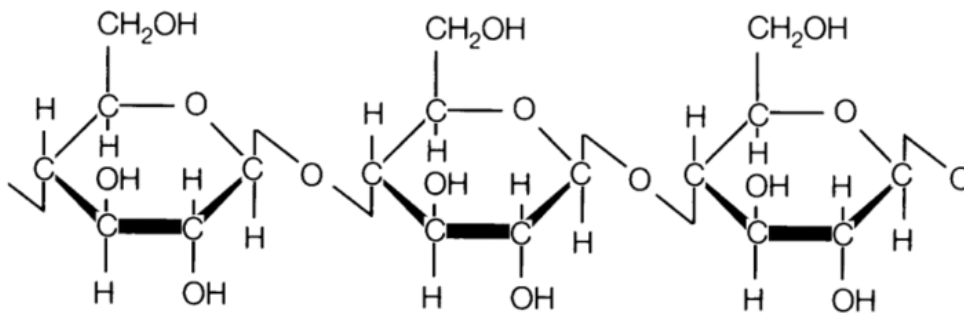
HLAVNÍ částí ovlivňující životnost a spolehlivost transformátoru je jeho elektroizolační systém, který je složen z kapalně a pevně složky. Toto spojení si je navzájem prospěšné, jelikož vylepšuje jednotlivé vlastnosti, neboť naimpregnovaný papír má lepší izolační parametry oproti neimpregnovanému; to vše umožňuje nadimenzovat elektroizolační systém na vysoké napěťové úrovni. Další výhodou tohoto uspořádání je odvod tepla - olej slouží nejen jako izolační, ale také jako chladicí médium odvádějící přebytečné teplo při provozu stroje. To dovoluje použít materiály z nižší teplotní třídy díky jejich menšímu tepelnému namáhání.

4.1 PEVNÁ ČÁST

Pevnou částí elektroizolačního systému se rozumí papír a lepenka. Tyto materiály naleznou uplatnění všude tam, kde je potřeba vytvořit pevné izolační rozhraní; jedná se například o izolace vývodů cívek, izolace mezi vinutími transformátoru, izolace drážek, izolace v průchodkách, v kondenzátorech a jinde.

Elektroizolační papír je jeden z nejlepších a nejlevnějších izolačních materiálů. Od běžného papíru se liší způsobem výroby, kdy je dbáno na jeho elektrické

a chemické vlastnosti tak, aby vyhověl provozním požadavkům. Pro použití v transformátoru je důležitá jeho nasákavost, jelikož papír je do oleje ponořen. Důležitými parametry jsou vysoká elektrická pevnost, relativní permitivita (při nasazení s olejem co nejbližší hodnotě oleje kvůli elektrickému namáhání), nízký ztrátový činitel atd. Jedná se o materiály na bázi celulózových vláken, což jsou lineární polysacharidy. Zdrojovou surovinou je bavlna a dřevo, konkrétněji čistá buničina, které prochází standardním papírenským zpracováním s několika úpravami zaměřenými na redukci kyselých složek, které podporují degradační procesy. Celulóza má chemický vzorec $C_6H_{10}O_5$, chemická struktura je uvedena níže na Obr.6 . Jejím základem jsou tři hydroxylové skupiny OH, které způsobují polárnost látky. [51, 52]



Obr. 6: Chemický vzorec celulózy

Tyto hydroxylové skupiny také způsobují navlhání papíru, což je jeho největší nevýhoda. Celulózová vlákna velmi snadno a rychle absorbují i velmi malou atmosférickou vlhkost. OH skupiny jsou také určující pro dielektrické vlastnosti papíru. Permitivita buničiny je 5.5 až 6, ale vzduchové mezery mezi vlákny ji snižují na výslednou hodnotu kolem 2.5. Tedy čím nižší hustota papíru, tím menší permitivita a naopak. [51, 52]

Papír je citlivý materiál. Rychle absorbuje vlhkost a snadno degraduje například působením vyšší teploty. Z tohoto důvodu je papír klasifikován v teplotní třídě 90 (Y), 105 (A) a 120 (E). [53] Papír degraduje prostřednictvím hydrolyzy, při které se rozpadají glykosidické vazby, a oxidace, při které dochází ke štěpení řetězců. Všechny degradační mechanismy svým působením oslabují mechanické vlastnosti vláken papíru, který následně křehne, a vlivem mechanických vibrací se rozpadá a ztrácí funkčnost. To je problematické hlavně v případě olejových transformátorů, kde na rozdíl od oleje, který můžeme regenerovat, je papír projektován na celou dobu života transformátoru. [51, 52, 54]

Elektrotechnická lepenka je navrstvený a slisovaný papír. Jednotlivá vlákna jsou díky tomu stlačena dohromady a tvoří jednolitý celek. Vlastnosti lepenky se liší dle typu. Dle normy ČSN EN 60641-2 [55] rozlišujeme na lepenku obyčejnou, lesklou, kalandrovanou, tvrzenou a hlazenou.

- Obyčejná lepenka je vícevrstvý papír vyrobený z drtě čistě rostlinného původu vysoké chemické čistoty. Používá se na méně náročné aplikace.
- Lesklá lepenka je vyrobena na lepenkovém stroji z papírové drtě čistě rostlinného původu, vysoké chemické čistoty, vysoké hustoty, s hladkým povrchem, vysokou mechanickou pevností a ohebností.
- Kalandrování je finální úprava obyčejné nebo lesklé lepenky, hlazení a leštění povrchu.

4.2 KAPALNÁ ČÁST

V oblasti elektroizolačních kapalin, stejně jako v každé jiné oblasti, probíhají určité trendy ve vývoji. Nejčastěji používanou kapalinou je dnes bezesporu minerální olej, pro něhož hovoří jeho snadná dostupnost, výborná elektroizolační

funkčnost (jak je ilustrováno v Tab 1) a ověřená funkčnost. Do popředí se ale dostává problematika biodegradability, které však minerální olej nevyhovuje. Těmto požadavkům vyhovují oleje na bázi přírodních esterů - rostlinné oleje, v našich zeměpisných oblastech oleje slunečnicové a řepkové, v jiných částech světa pak oleje sojové, palmové a další.

Jako na každý materiál, i na transformátorový olej, jsou kladeny určité požadavky:

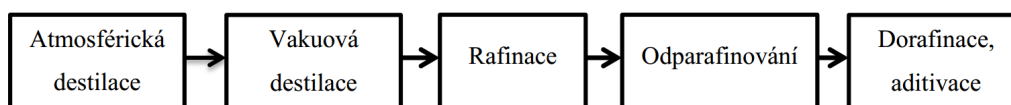
- výborná elektroizolační schopnost
- schopnost odvodu tepla
- nízký bod tekutosti
- vysoký bod vzplanutí
- dostupnost suroviny a cena

4.2.1 *Minerální olej*

Minerální olej, dnes hojně rozšířen, zcela vyhovuje všem požadavkům na použití jako elektroizolační kapalina v transformátorech. Jeho výroba, a následná likvidace v případě poruchy či ukončení životnosti, je však náročná, a to jak z technologického, tak ekologického hlediska. Jeho cena je v porovnání s alternativními kapalinami nízká. Možným problémem do budoucna bude jeho dostupnost, respektive dostupnost zdrojové suroviny.

Vyráběn je destilací ropy, která je zbavena nečistot, anorganických solí, vody a obsahuje co nejméně sirných sloučenin. Destilace je rozdělena do několika etap, při kterých se při různých teplotách odpařují nebo kondenzují jednotlivé rafináty. V první části probíhá atmosférická destilace, která odstraní lehké destiláty

jako jsou benzín, petrolej a plynový olej. Dalším krokem je vakuová destilace odstraňující z mazutu plynový olej, lehké, středí a těžké oleje. Toto následuje rafinace oddělující jednotlivé ropné frakce dle délky uhlovodíkových řetězců. V tomto kroku se odstraní také nežádoucí příměsi zhoršující jeho vlastnosti. Následuje odparafinování, kdy se odstraní parafíny zhoršující vlastnosti při nízkých teplotách. Posledními kroky jsou dorafinace, kdy se odstraní zbytky polárních látek, a aditivace, která zlepší vlastnosti oleje. [56, 57]



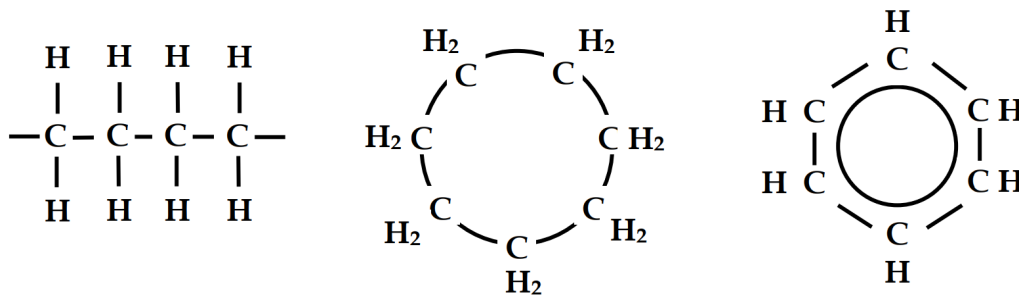
Obr. 7: Zjednodušené schéma výroby minerálního oleje

Z chemického hlediska se minerální olej řadí do kategorie uhlovodíků. Blíže rozlišujeme tři kategorie lišící se výrobním procesem, příměsemi (a tedy místem těžby) a oblastí použití, na:

- parafinické
- naftenické
- aromatické

Pro energetiku jsou důležité první dvě kategorie, které se používají na výrobu transformátorových olejů.

Parafinické oleje jsou nasycené uhlovodíky s rozvětvenými (izoalkany, izoparafíny) a nerozvětvenými (n-alkany) řetězci s obecným vzorcem C_nH_{2n+2} , jsou chemicky stálé, mají lehce zvýšenou viskozitu, vyšší bod teploty i vzplanutí a vyšší odolnost vůči oxidaci. Naftenické oleje jsou cyklické uhlovodíky s obecným vzorcem C_nH_{2n} , chemicky jsou méně stálé s nízkým bodem teploty. Aromatické oleje jsou cyklické nenasycené uhlovodíky, obecný vzorec C_nH_{2n-6} , cha-



Obr. 8: Uhlovodíkové vazby v minerálních olejích (zleva parafinická, naftenická, aromatická [58])

Charakteristická je pro ně tmavá barva, použití nalézají jako přísady do lepidel, gum atd. [23, 58, 59]

Důležitá vlastnost minerálních olejů je schopnost elektrické izolace charakterizována přeskokovým napětím U_P [kV/2.5mm], jehož požadavky udává norma ČSN EN 60422 - Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních [60]. Pro transformátory s provozním napětím do 72.5 kV je požadovaná velikost U_P minimálně 55 kV/2.5mm, pro vyšší napětí pak minimálně 60 kV/2.5mm. Dalším důležitým parametrem, udávajícím velikost ztrát, je ztrátový činitel δ . Pro provoz je důležitým parametrem viskozita oleje, její tepelná závislost a teplota tekutosti. [61]

Regenerace minerálního oleje

Vlastní životnost transformátorového oleje se dá, na základě servisních měření, obnovit pomocí regenerace. Během ní se obnoví funkční vlastnosti jako např. přeskokové napětí, ztrátový činitel, obsah vody, číslo kyselosti a obsah inhibitoru. Během regenerace se nejen vyčistí olejová náplň, ale vlivem cirkulace se očistí i vinutí - tzv. desludging. Vlastní regenerace sestává z filtrace pevných částic, fyzikálně-chemického odstraňování produktů stárnutí na sorpčním materiálu a

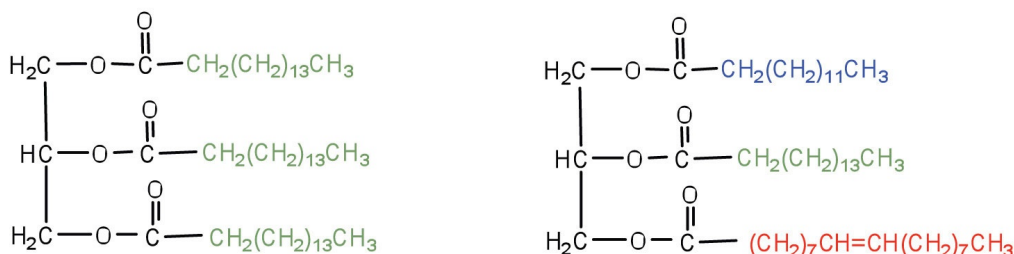
vysoušení s odplynováním. Jako sorpční materiál se používají zeolity, což jsou hlinitokřemičité minerály mající porézní prostorovou strukturu s velkým aktivním povrchem. Typickým zástupcem je Fullerova hlinka. [45]

Regenerační proces začíná zahřátím oleje na přibližně 75 °C, což umožní přechod vody adsorbované v lepence do oleje, ze kterého se následně vyfiltruje. Prvním krokem samotné regenerace je průchod filtrem o pórovitosti řádově 125 μm a následně 30 μm . Tím se odstraní hrubší nečistoty. Z filtrů jde olej do sorpčních kolon, kterých je řádově 12, obsahujících Fullerovu hlinku, ve které probíhá fyzikálně-chemická regenerace oleje odstraňující produkty stárnutí. Po průchodu kolonami olej podstupuje ještě jednu filtraci. Takto upravený olej je připravený do vakuové odplynovací komory, která ho vysuší a zbaví plynů. Tímto je dokončen regenerační proces. Na závěr se provede ověřovací měření dielektrických parametrů, zda-li bylo dosaženo cílových hodnot. Na závěr se doplní množství inhibitoru (který se spotřebovává v čase) dle požadavků. Jako inhibitory se v minerálních olejích používají fenolické a aminové inhibitory, nejčastěji DBPK (2,6-di-terc. butylparakresol), a to v množství 0.3 % hmotnosti oleje. [45]

Sorpční kolony vydrží několik takovýchto regenerací olejové náplně než ztratí většinu svých sorpčních vlastností. Poté musí i samotný materiál podstoupit reaktivaci, která se provádí přivedením horkého vzduchu, a tedy zahřátím, čímž započne termochemická reakce, která sorpční materiál zbaví zachycených částic. Samotný reaktivační proces trvá přibližně 5 hodin, k čemuž je potřeba připočít čas na vychladnutí sorpčních kolon. Takto reaktivovaný sorpční materiál má vlastnosti velice blízké těm původním. Reaktivační proces lze opakovat do doby, než hlinka mechanicky zdegraduje. [45]

4.2.2 Rostlinné oleje

Všechny rostlinné oleje, bez ohledu na druh, spadají do kategorie přírodních esterových olejů vyráběných ze zemědělských plodin dle kterých získávají název. Chemicky se jedná o lipidy, což jsou deriváty mastných kyselin trojsytného alkoholu; jde o triglyceridy skládající se z glycerolu a tří mastných kyselin (ty mohou být stejného či různého typu). Mastné kyseliny se vyznačují řetězcem o sudém počtu atomů uhlíku (od 4 do 28). Tato chemická struktura je naznačena na Obr. 9. [62]



Obr. 9: Triglyceridy s třemi mastnými kyselinami

Výrobě rostlinných olejů předchází několik přípravných etap. Sklizená semena se nejprve pročistí a vysuší, poté nadrtí, což zlepšuje celkovou výtěžnost oleje. Až poté se přistupuje k získávání oleje ze semen, a to buď lisováním, extrakcí nebo kombinací obou metod. Lisování semen probíhá ve dvou etapách aplikací vysokého tlaku (až 40 MPa). Tím se sníží obsah oleje v pokrutinách na 8-9 %. Při této extrakci přechází jedna rozpustná složka do jiné kapalné složky, ze které se ale musí následně oddělit rozpouštědlem v závislosti na druhu oleje. [62, 63]

Takto získaný olej ale není použitelný pro elektroizolační systémy, jelikož obsahuje mnoho složek (a to složek rozpustných, nerozpustných a kyselých) negativně ovlivňujících jeho výsledné vlastnosti. Na řadu tedy přichází zušlechťování oleje neboli rafinace, což je převážně odkyselování, tedy odstranění volných mastných kyselin. To se provádí prostřednictvím destilace, neutralizace a esterifikace. Neutralizací se rozumí odstranění volných mastných kyselin za pomoci hydroxidu sodného (NaOH), kdy vzniká vrstva mýdla, který se odstraňuje odstředěním. Dále destilace, při které se olej zahřívá, kyseliny se odpaří a vakuovým procesem odstraní z nádoby. Při esterifikaci se pro odstranění kyselin využívá reakce metylalkoholu s olejem za vzniku glycerolu, který se následně odstraní. To probíhá při vakuu a vysoké teplotě. [62, 63]

Vlastnosti oleje nejvíce ovlivňuje právě složení a druh mastných kyselin v oleji. Větší zastoupení nasycených mastných kyselin například zlepšuje oxidační stabilitu oleje, nicméně ho také dělá tužším, více viskózním s vysokým bodem tuhnutí. Oproti tomu vysoké zastoupení nenasycených kyselin zhoršuje oxidační stabilitu oleje, což ho činí náchylným k deterioračním procesům. [23]

Mastné kyseliny mají sudý počet atomů uhlíku C, a to od $C = 4$ po $C = 28$. Dělí do dvou skupin na nasycené a nenasycené. [23, 63]

- Nasycené mastné kyseliny - jsou bez dvojitých vazeb uhlíku C a mají vysoký bod tání, kdy od kyseliny kaprinové (počet C 10) mají pevný charakter. V rostlinných olejích se objevuje nejčastěji kyselina palmitová (C16:0) a stearová (C18:0).
- Nenasycené mastné kyseliny - v rostlinných olejích jejich zastoupení převažuje. Dělí se dle počtu dvojných vazeb na monoenové (1 vazba), dienové (2 vazby) a polyenové (více vazeb); umístění první dvojně vazby na n-9, n-6 a n-3; a dle geometrické izometrie na cis a trans konfiguraci. Charakterizo-

vány jsou počtem uhlíků C spolu s počtem dvojných vazeb (např. C18:1), dále pak typem vazby a jodovým číslem.

Jodové číslo udává stupeň nenasycenosti tuku (tj. obsahu dvojných vazeb). Udává se jako množství jodu adované ve 100 g tuku. Toto číslo nám přibližuje reakci mastné kyseliny na vzduchu a dělíme je následovně [63]:

- nevysýchavé - jodové číslo pod 100, při interakci se vzduchem zůstávají kapalné.
- pomalu vysýchavé - jodové číslo 110-140, na vzduchu tuhnou po delší době.
- vysýchavé - jodové číslo nad 150, za přístupu vzduchu tuhnou po krátké době, polymerací se tvoří povrchová vrstvička.

V následující Tab. 3 jsou uvedeny nejčastější mastné kyseliny v závislosti na druhu oleje.

Tab. 3: Zastoupení vybraných mastných kyselin v rostlinných olejích [23]

Olej	Saturované		Mono-nenasycené	Poly-nenasycené	
	Palmitová	Stearová	Olejová	Linolová	α -linolenová
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Arašídový	11	2	48	32	-
Olivový	13	3	71	10	1
Sojový	11	4	24	54	7
Slunečnicový	7	5	19	68	1
Slunečnicový HO ¹	3 - 5	3 - 6	75 - 85	8 - 10	-
Řepkový	4	2	62	22	10

¹ HO - high oleic, tedy vysoko-oleický slunečnicový olej

Z uvedeného přehledu můžeme vyvodit základní fyzikální vlastnosti uvedených olejů. Větší zastoupení satureovaných mastných kyselin (tedy v tabulce levá strana) znamená větší oxidační stabilitu, ale také menší tekutost oleje. Tyto vlastnosti se obrací s přesunem do pravé strany tabulky (k vyššímu zastoupení nenasycených mastných kyselin s větším počtem dvojných vazeb).

Obecnými vlastnostmi rostlinných olejů je (kromě výborných elektroizolačních parametrů) třeba vysoký bod vzplanutí (kolem 300-320°C), kterým vysoko předčí minerální oleje a činí jej vhodným pro použití v prostorech s důrazem na požární bezpečnost; dále pak zanedbatelný obsah síry, což je opět výhodné v porovnání s minerálními oleji. Typickou vlastností je však také nízký bod tekutosti, který závisí na druhu oleje (respektive na složení jeho mastných kyselin). Pohybuje se v rozmezí -15 až -25 °C. To značně komplikuje použitelnost rostlinných olejů v chladných oblastech. Nízkoteplotní vlastnosti se dají spojit s dalším parametrem, kterým je viskozita. Její hodnota je u rostlinných olejů vyšší (a to až pětinásobně) oproti minerálním olejům.

Toto činí problematický tzv. "retrofit", kdy se za minerální olej použije olej rostlinného původu. Vyšší viskozita klade větší nároky na cirkulační okruh, a tedy na chlazení transformátoru. Toto, ve spojení s nízkým bodem tekutosti, způsobuje problémy při nasazování, kdy se s použitím rostlinného oleje musí počítat již při návrhu a konstrukci stroje. To, mimo jiné, nastiňuje Hosier et al [64], který uvádí naměřené hodnoty viskozity, oxidace a dielektrických ztrát u různých rostlinných druhů olejů. Z výsledků lze tvrdit, že z měřených olejů je pro aplikace vhodný řepkový olej se všemi parametry přijatelnými, kdežto slunečnicový olej, byť v elektrických parametrech vyniká, se ukázal nedostatečný kvůli špatné oxidační stabilitě a velkému vzrůstu viskozity. Skutečnosti vedoucí k těmto jevům budou vysvětleny v následující kapitole. Dalším neduhem rostlinných olejů je jejich sklon k navlhání. To je dáno jejich chemickou strukturou.

Množství potencionálně vázané vody je, v porovnání s minerálním olejem, několikanásobné. [64–66]

Požadavky na nové, nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů uvádí Tab. 4.

Tab. 4: Požadavky na přírodní esterové oleje [25]

Parametr	Norma	Limitní hodnota
viskozita při 40, 100 °C	ISO 3104	50, 15 cSt
bod tekutosti	ISO 3016	max. -10°C
obsah vody	IEC 60814	max. 200 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	min. 35 kV/2.5mm
ztrátový činitel $\text{tg } \delta$	IEC 60247	max. 0.05
číslo kyselosti	IEC 61125	max. 0.6 mg KOH/g
bod vzplanutí, hoření	ISO 2719, 2592	min. 250 °C, 300 °C

PROVEDENÉ EXPERIMENTY

VLIV ELEKTRICKÉHO NAMÁHÁNÍ NA RYCHLOST DEGRADACE

CÍLEM prvního experimentálního měření bylo definování vlivu elektrického namáhání na rychlost degradace vybraných olejů. Těmito oleji byli dva zástupci přírodních esterových olejů - olej řepkový a slunečnicový. Vliv elektrického napětí byl sledován na modelovém elektroizolačním systému olej-papír.

Zkoumání vlivu elektrické degradace jak střídavého, tak stejnosměrného napětí, má své praktické opodstatnění. Vliv střídavého napětí je důležitý z hlediska provozních podmínek a vlastností výkonových transformátorů, jelikož izolační systém je nejcitlivější částí celého stroje. Vliv stejnosměrného napětí je důležitý z hlediska stále většího používání měničů napětí a dálkových stejnosměrných přenosových soustav.

5.1 ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ JAKO DEGRADAČNÍ ČINITEL

Vliv elektrického napětí, potažmo intenzity elektrického pole, je jeden z nejdůležitějších a nejčastějších degradačních činitelů působících na elektroizolační systém. Díky jeho působení se mohou v systému hromadit degradační produkty,

které dále negativně působí a snižují zbývající životnost. Rozlišujeme několik druhů průrazů [45]

- Elektrický průraz

Nastává když je nárůst intenzity přiloženého elektrického pole tak rychlý, že nestačí dojít k ohřátí izolačního materiálu či působení jiných faktorů, a kdy dojde k okamžité destrukci v nejslabším místě izolace. Vliv ostatních degradačních faktorů je zanedbatelný.

- Tepelný průraz

Závisí na době přiloženého napětí, jeho frekvenci a samozřejmě teplotě. Vliv nehomogenit materiálu není pro vznik průrazu tak důležitý, hlavním faktorem je lokální přehřátí materiálu kvůli Jouleovým a dielektrickým ztrátám. V těchto místech roste elektrická vodivost, což způsobuje další nárůst ztrát a tedy další lokální ohřev. Výsledkem tohoto kumulativního procesu je průraz materiálu.

- Elektrochemický průraz

Dlouhodobým působením přiloženého napětí se v materiálu vyvolávají chemické procesy (např. elektrolyza), které vyvolají změny postupně snižující výslednou elektrickou pevnost izolace. Tyto změny mohou v materiálu vyvolávat částečné výboje, které svou činností urychlí degradaci. Nepovažuje se za samostatný druh průrazu, protože postupná degradace vlastností sama o sobě nezpůsobí průraz, ten nejčastěji vzniká jako průraz tepelný.

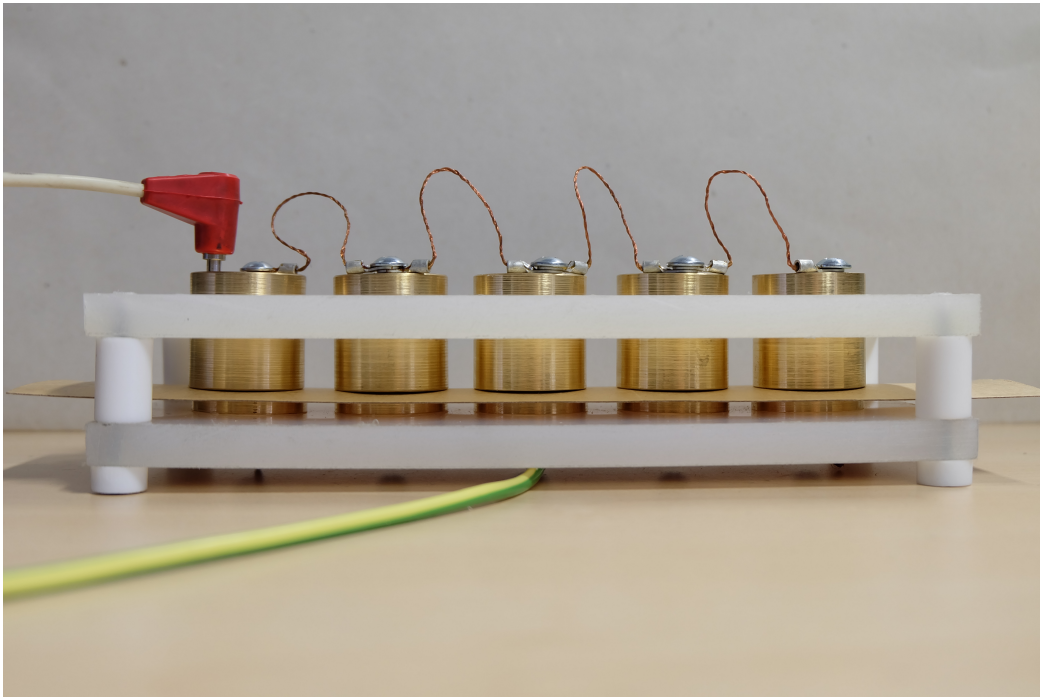
Při posuzování vlivu elektrického pole je třeba posuzovat i další parametry jako druh napětí, jeho frekvence, tvar vlny, spojitost či rychlost změny napětí. Rozlišujeme:

- Střídavé napětí 50 Hz - což je nejrozšířenější druh používaný ve všech elektrických strojích. Princip degradace spočívá ve stárnutí maximální hodnotou přivedeného napětí, jež pravidelně mění polaritu. Jeho vliv je značně prozkoumán a zdokumentován příslušnými normami a metodikami měření.
- Stejnoseměrné napětí - důležitý pro rozšiřující se dálková vysokonapěťová (až 1 MV) vedení díky menším přenosovým ztrátám. Degradace probíhá stálým působením maximální hodnoty prostřednictvím vytváření prostorového náboje v materiálu.
- Napěťové pulsy - oblast problematiky výkonových pulsních měničů, měničů kmitočtu a řízení pohonů obecně. Mluvíme o něm při strmosti hrany vyšší než $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ a zároveň frekvenci vyšší než 1 kHz. Degradace probíhá prostřednictvím hodnoty napětí i její strmosti. Vysoká frekvence opakování způsobuje také ohřev izolačního materiálu, a tedy jeho větší namáhání. S vysokou frekvencí také narůstá výbojová činnost.

5.2 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ, MATERIÁLŮ A METODIKY

Elektrodový systém (vyobrazený na Obr.10) byl navržen tak, aby simuloval elektroizolační systém olej-papír v transformátorech či průchodkách. Složen je z pěti elektrod, mezi které se vkládá pevná složka izolačního systému. Elektrody mají průměr 25 mm, sražené hrany a společný přívod napětí a společné uzemnění.

Jako kapalná složka byl použit řepkový a slunečnicový olej, jejichž rychlost degradace pod různými druhy napětí (AC a DC) bude vyhodnocena. Oba druhy oleje jsou typickými zástupci lokálně dostupných rostlinných olejů.



Obr. 10: Elektrodotý systém pro měření rychlosti degradace

Oba oleje byly použity v potravinářské kvalitě s inhibičtorem BHT v množství $0.4 \text{ } \%_{hm}$. V obou olejích převládá zastoupení nenasycených mastných kyselin (viz. Tab. 3). Jejich elektrické parametry jsou následující:

Jako pevná složka byla použita lepenka Weidmann o tloušťce 0.2 mm , která byla před použitím vysušena a následně impregnována v daných olejích. Takto připravená lepenka (1 pásek přes všech 5 elektrod) byla vložena do elektrodotého systému. Snímek lepenky po měření, na které jsou viditelné vlivy degradace a díry po průrazech, je uveden na následujícím Obr.11.

Vlastní měření odolnosti proti namáhání střídavému napětí probíhalo v uzavřené kleci se zdrojem střídavého napětí $25 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$, čítačem doby do průrazu a automatickým systémem odpojení v případě průrazu.

Tab. 5: Vlastnosti použitých olejů

Parametr / olej	Řepkový	Slunečnicový
Hustota při 15 °C [g/cm^{-3}]	0.9211	0.9234
Viskozita při 40 °C [cSt]	35.7	32.67
tg při 90 °C [-] δ	0.038	0.007
U_P [kV/2.5mm]	51.19	64.31
Permitivita ϵ [-]	3.23	3.16
Číslo kyselosti [mgKOH/g]	0.092	0.042
Rezistivita při 90 °C [$\Omega \cdot cm$]	$9.45 \cdot 10^7$	$1.03 \cdot 10^8$

Měření odolnosti proti stejnosměrnému napětí probíhalo v podobně zajištěné měřicí kleci. Zde však absentoval systém automatického odpojování při průrazu, byla tedy nutná nepřetržitá obsluha. Celé měření probíhalo za standardních podmínek.

Metodika měření byla v obou případech shodná. Zaznamenávaly se časy do průrazu na všech 5 elektrodách v elektrodovém systému na dané napěťové hladině. Opakováním na více napěťových hladinách jsme docílili dostatku dat na vytvoření křivky odolnosti vůči jednotlivým druhům napěťového namáhání.

5.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Odolnost vůči střídavému napětí

Střídavé napětí, jak již bylo řečeno, je z dvojice zkoumaných napětí svým charakterem agresivnější. To potvrzují i výsledky měření, kdy pro podobné časy do průrazu byly napěťové hladiny u střídavého napětí níže než u napětí stejnosměr-

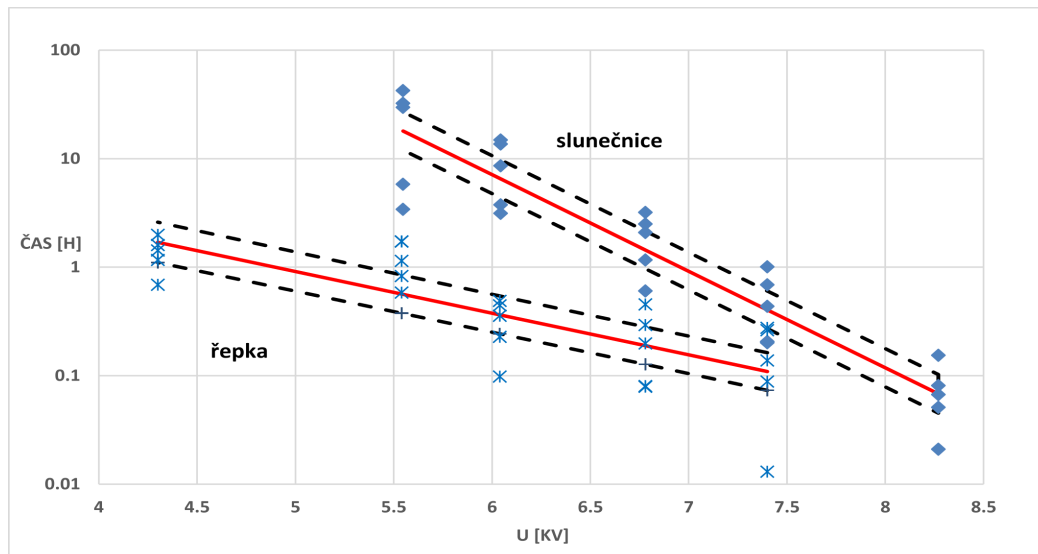


Obr. 11: Lepenka po měření s viditelnou degradací a průrazy

ného. Menším nedostatkem se u řepkového oleje jevila nemožnost prokazatelně zaznamenávat průrazy na menších než uvedených napěťových hladinách (intenzita pole byla na tak nízké úrovni, že průraz nastával výhradně díky chemické degradaci po několika stovkách až tisíci hodinách bez možnosti jednoznačné identifikace).

Na Obr.12 je vidět výsledná křivka z naměřených hodnot, na které byl použit exponenciální model. Z této křivky se při logaritmické ose Y stane přímka, kolem které jsou roz distribuovány body naměřených časů. Tyto části křivek lze tedy používat jako základ pro aproximaci hodnot při jiných úrovních napětí či době degradace.

Je vidět, že oba oleje se pohybují na prakticky shodných napěťových hladinách. Porovnání rychlosti degradace proběhlo analýzou směrnic proložených křivek. Z

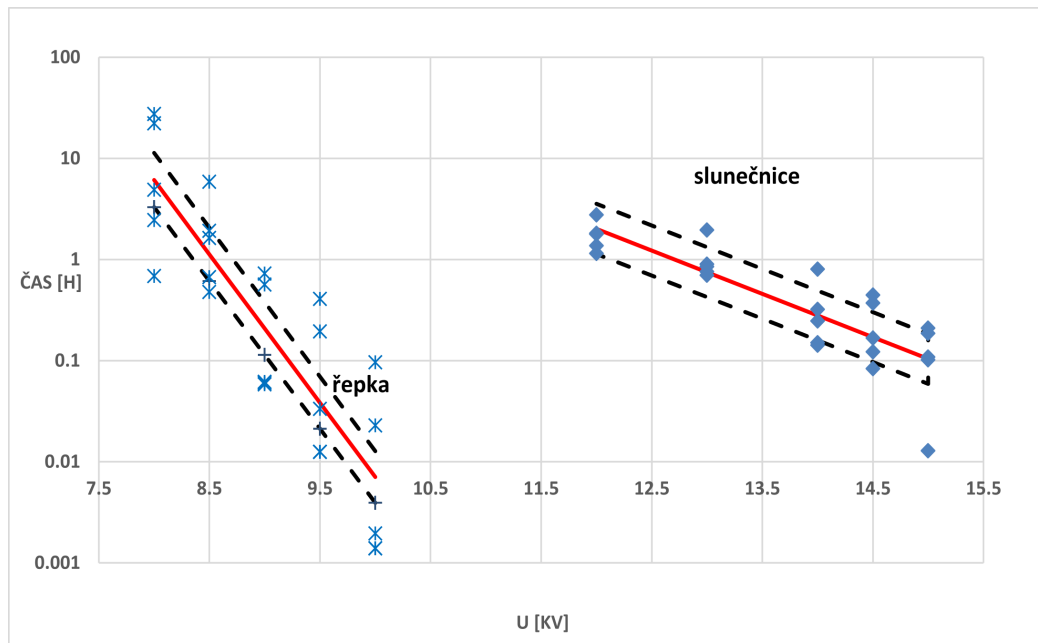


Obr. 12: Křivka odolnosti vůči střídavému napětí

grafu lze pozorovat, která přímka má větší strmost; větší strmost znamená rychlejší stárnutí systému. Z analýzy vyplývá, že menší rychlost stárnutí má řepkový olej. Jeho hodnota směrnice je -0.88 , slunečnicového oleje -2.05 . Jejich rozdíl 1.16 je statisticky významným ukazatelem rychlosti degradace.

Odolnost stejnosměrnému napětí

Degradace stejnosměrným napětím má odlišný charakter; jde o dlouhodobé působení maximální hodnoty, které není z hlediska elektrického namáhání tolik agresivní. Průraz tedy vzniká spíše elektrochemickými procesy. Při průrazech se dají očekávat vyšší napěťové hladiny, což se potvrdilo. Pro obdobné časy do průrazu, v porovnání s AC namáháním, byly napěťové hladiny přibližně 1.5 násobné. Pozorovatelný (na Obr.13) je také větší rozestup mezi měřenými oleji. Řepkový olej se opět pohybuje na nižších hladinách.



Obr. 13: Křivka odolnosti vůči stejnosměrnému napětí

Rychlejší stárnutí probíhalo u EIS s řepkovým olejem. Analýzou směrnic se dostaneme k rozdílu směrnice 2.39 (slunečnicový -0.99, řepkový -3.38), což je významný rozdíl.

Shrnutí měření

Z výše uvedeného lze vyvodit následující. Pro praktické použití v zařízeních pracujícím se střídavým napětím lze doporučit řepkový olej, který vykazoval značně menší tendenci ke stárnutí. Jeho nižší hodnota elektrické pevnosti určitě není problematická, neboť oba oleje jsou vysoko nad hodnotou, na kterou se transformátory navrhují (3 kV/mm). Náš závěr podporuje i fakt, že řepkový olej tvoří hlavní složku již dlouhodobě používaného oleje Midel eN.

Výsledky druhé části, tedy odolnosti vůči stejnosměrnému napětí, hovoří ve prospěch slunečnicového oleje. Ten byl na vyšší napěťové hladině, a zároveň měl znatelně menší rychlost degradace. Jeho časová stálost, co se výsledků měření týče, však nebyla valná. Olej projevoval během měření velikou variabilitu a nepředvídatelnost na základě předchozích výsledků, jakož i brzké počátky gelace.

ZPOMALENÍ OXIDAČNÍCH PROCESŮ V ROSTLINNÉM OLEJI

DRUHÝM zde uvedeným experimentem bylo prozkoumání možnosti zpomalení oxidačních procesů v řepkovém oleji pomocí několika různých antioxidantů. Řepkový olej byl zvolen na základě doporučení z prvního experimentu, kde vyšel jako lepší, méně degradující, z testované dvojice olejů. Potřeba zpomalit oxidační procesy vyplývá z výše uvedených vlastností rostlinných olejů, které díky značnému zastoupení nenasycených mastných kyselin postrádají dlouhodobou oxidační stabilitu.

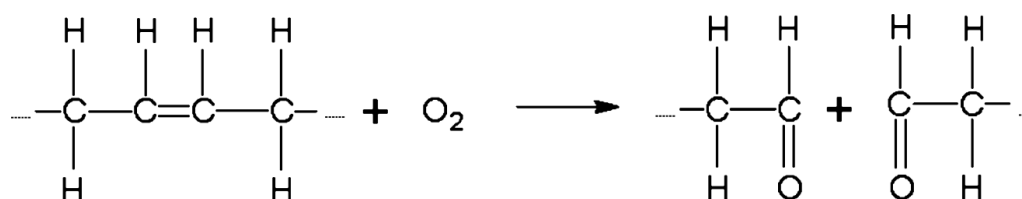
Prostředkem k dosažení tohoto vyhodnocení byly testy oxidační stability, které jsou popsány v platných normách. Ty mají za cíl přiblížit provozní podmínky a simulovat tak reálné působení vlivů při zrychleném testu.

6.1 OXIDAČNÍ PROCESY V OLEJI A JEJICH VÝZNAM

Oxidační stabilita přírodních esterů je značně ovlivněna zastoupením mastných kyselin (viz. Tab.3 ve které je toto zastoupení uvedeno). Vlastnosti plynoucí ze složení mastných kyselin jsou však protichůdné. Vyšší zastoupení nasycených mastných kyselin sice činí olej oxidačně stabilním, avšak také méně tekutým (s

vysokým bodem tekutosti); při převažujícím zastoupení nasycených mastných kyselin bychom mluvili o pevných látkách - tucích. Naopak vysoké zastoupení nenasycených mastných kyselin je, co se tekutosti oleje týče, výhodné; na opačné straně vah je však značné snížení oxidační stability. [23]

Co činí nenasycené mastné kyseliny náchylné k oxidaci je obsah dvojitých vazeb uhlíku C=C. Jejich obsah závisí na druhu nenasycené mastné kyseliny - mono-nenasycené mastné kyseliny obsahují 1 vazbu (např. kys. olejová), di- (např. kys. linoleová) a poly-nenasycené (např. kys. linoleická) pak 2 a 3 dvojité vazby. Dle jejich zastoupení v oleji můžeme tedy posuzovat jeho náchylnost k oxidaci. Mastné kyseliny mají totiž slabá místa díky absenci elektronu u kyslíku v dvojitě vazbě v karbonylové skupině (vazba C=O), a k tomu nenasycené mastné kyseliny mají další elektronovou vakanci u vazby C=C. Tyto místa jsou pak snadno napadána volnými radikály a vysokoenergetickými částicemi, které se k uhlíku naváží a rozbijí tak strukturu mastné kyseliny za současného vzniku dalších volných radikálů. To je zjednodušeně naznačeno na Obr. 14. Při oxidačních reakcích vznikají volné radikály, alkoholy, aldehydy, kyseliny a další produkty obsahující kyslík. Tím roste také viskozita oleje a olej počíná gelovat. Oxidace je exponenciální proces. Nejprve probíhá zvolna, ale s hromaděním oxidačních produktů zrychluje. K dalšímu zrychlení přispívá vliv zvýšené teploty, záření a přítomnost kovových částic. [23, 35]



Obr. 14: Znázornění oxidace mastných kyselin

6.2 POTLAČENÍ OXIDAČNÍCH PROCESŮ

Ochranu proti oxidaci oleje v oxidačním prostředí nám zaručí specifické látky zvané antioxidanty. Jejich přidání je běžnou cestou ke zpomalení, předejití a přerušování oxidačních procesů způsobených volnými radikály. Tyto antioxidanty předcházení oxidačním procesům tak, že se navážou na volné radikály a zne-možní jim dále reagovat. Takto se v oleji snižuje obsah volných radikálů, jejichž menší počet je pro dlouhodobou degradaci žádoucí. Dalšími mechanismy k po-zastavení procesů vytváření volných radikálů jsou [35]:

- Vyhledávání částic způsobujících peroxidaci, tedy oxidační degradaci
- Vstřebáním kovových částic, iontů, které jsou reaktivními částicemi
- Potlačení radikálů kyslíku O_2 čímž předcházení vytváření oxidů
- Rozbíjením autooxidačních řetězových reakcí
- Snižením lokálních koncentrací O_2

Efektivita výše uvedených antioxidačních procesů závisí na několika fakto-rech jako je aktivační energie, náchylnost antioxidantu na teplotě, jeho rozpust-nost atd. Antioxidační reakce jsou navíc exotermické; tedy s rostoucí energií disociace mastných kyselin a antioxidantů roste i aktivační energie, a tím klesá efektivita antioxidačních procesů. Nejúčinnější antioxidační reakce jsou ty, které narušují řetězové reakce volných radikálů. Zjednodušeně řečeno tak činí daro-váním atomu vodíku volnému radikálu, který tím stabilizují; sami se však stá-vají volným radikálovým meziproduktem, který je však záhy stabilizován díky elektronové delokalizaci. To je naznačeno na následující rovnici 1. Podobné pro-cesy závisí na chemické struktuře samotného antioxidantu, jelikož samozřejmě

ne všechny sloučeniny reagují stejným způsobem na stejné chemické sloučeniny. [35]



kde R' reprezentuje volný alkylový radikál, ROO' je vysokoenergetický peroxidový radikál, $ROOR$ je hydroxyperoxid.

Účinek antioxidantů lze ještě zvýšit synergickým použitím dvou antioxidantů, kde každý díky svému chemickému složení využívá primárně jiný mechanismus k pozastavení oxidace, a tak zvyšují antioxidační účinek.

6.3 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ, MATERIÁLŮ A METODIKY

Tento experiment byl založen na testu oxidační stability (dále zkráceně TOS) popisovaném v normě ČSN EN 61125 a normě IEC 10/939/Q zabývající se přírodními estery, jako doplněk k prvně uvedené 61125. Námi použitá variace TOS se skládá ze dvou kroků. Prvním je tepelné stárnutí vzorků při 150 °C po 164 hodin, kdy jsou vzorky v uzavřených lahvičkách, které se každých 24 hodin vyjmou z pece, otevřeli a protřepali pro lepší přístup vzduchu s olejem. Druhým krokem je měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ před tímto testem a po něm. ČSN EN 60296 ed.2 udává limitní hodnoty ztrátového činitele před testem oxidační stability (0.05) a po něm (0.5). Tyto limity jsou platné pro minerální transformátorové oleje, a bylo jich, díky absenci vlastních limitů pro test oxidační stability pro esterové oleje, využito pro posouzení výsledku vzorku v našem testu. ČSN EN 62770 Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory, udává limitní hodnotu ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ 0.5, což je opět v souladu s výše uvedeným. [25, 67]

Měření ztrátového činitele a permitivity bylo prováděno na dielektrickém analyzátoru Tettex 2830/2831 s vhodným elektrodovým systémem 2903. Měření probíhalo dle ČSN EN 60247 při napětí 500 V v teplotním rozsahu 30 až 90 °C.

V rámci testu byl také posuzován vliv antioxidantů na velikost přeskokového napětí. Měření probíhalo po přimíchání antioxidantů do oleje; vliv teplotního stárnutí v rámci TOS zahrnut nebyl. Použit byl vysokonapěťový zdroj o maximálním napětí 200 kV o síťovém kmitočtu, napěťový růst byl nastaven na 2 kV/s. Měření probíhalo dle ČSN EN 60156 při vzdálenosti elektrod 2.5 mm.

Dále byla provedena měření frekvenčních a teplotních závislostí dielektrických parametrů $\text{tg } \delta$ a reálné části komplexní permitivity ϵ' pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie (BDS) na spektroskopu Novocontrol Alpha-A s příslušným elektrodovým systémem ZGS. Olejový vzorek byl umístěn do měřicí cely BDS 1308, ve které jsou cylindrické elektrody o průměru 20 mm, vzdálenost elektrod byla 100 μm . Měření probíhalo ve frekvenčním rozsahu 0.5 Hz až 1 MHz, a v teplotním rozsahu -60 °C do 90 °C. Amplituda přiloženého napětí byla 1 V.

Specifikace materiálů

Použitý zástupce přírodních esterových olejů byl již zmíněn na začátku kapitoly - jedná se o řepkový olej, který byl použit i v předchozím měření, kde jsou uvedeny i jeho elektrické vlastnosti. Zde nás ale bude zajímat jeho chemické složení, konkrétně složení mastných kyselin uvedené v Tab.6, ze kterého můžeme vyčíst některé důležité fyzikální a chemické vlastnosti.

Již bylo zmíněno, že obsah mastných kyselin ovlivňuje oxidační stabilitu a teplotnost oleje. K popisu výše uvedené tabulky - první dvě mastné kyseliny jsou kyseliny nasycené, tedy zaručují oxidační stabilitu avšak jsou pevné. Prostřední, kyselina olejová, je mono-nenasycená, tedy její řetězec obsahuje jednu dvojitou

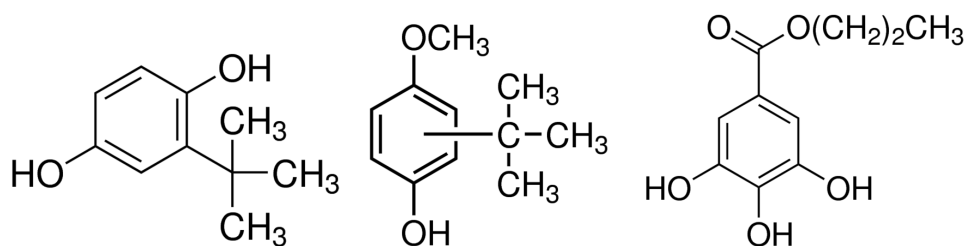
Tab. 6: Složení mastných kyselin v řepkovém oleji

Kyselina	Palmová	Stearová	Olejová	Linoleová	Linoleická
Obsah (%)	4	2	62	22	10

vazbu uhlíku. Poslední dvě jsou zástupci di- a poly-nenasycených mastných kyselin se dvěma, respektive třemi, dvojitými vazbami. Jejich vysoký obsah zaručuje tekutost oleje, ale negativně ovlivňuje oxidační stabilitu. U řepkového oleje tedy značně převažuje obsah nenasycených kyselin (94 %), z nich 32 % je nenasycených mastných kyselin s více vazbami. Lze tedy usuzovat, že řepkový olej má slušnou hodnotu bodu tekutosti, avšak nevyniká jeho dlouhodobá oxidační stabilita.

Použité antioxidanty

V tomto testu byly použity tři zástupci syntetických antioxidantů a jeden antioxidant přírodní. Jedná se o Propyl Gallate (dále v práci označován jako PG), tert-Butylhydroquinone (BTHQ) a Butylovaný hydroxyanisol (BTHX) jako zástupci syntetických antioxidantů. Poslední použitý antioxidant, zástupce přírodních antioxidantů, byla kyselina citronová (CA).



Obr. 15: Strukturní vzorce použitých antioxidantů, zleva BTHQ, BHTX a PG [68]

Všechny výše uvedené antioxidanty jsou používány v potravinářském průmyslu, nejčastěji ve spojitosti s tuky a rostlinnými oleji, kde zabraňují žluknutí, oxidaci a zároveň nemění barvu či zápach potraviny.

Číslování vzorků

K orientaci mezi použitými vzorky a koncentracemi antioxidantu slouží Tab.7. Vyznačen není vzorek 1, který slouží jako referenční vzorek bez antioxidantu.

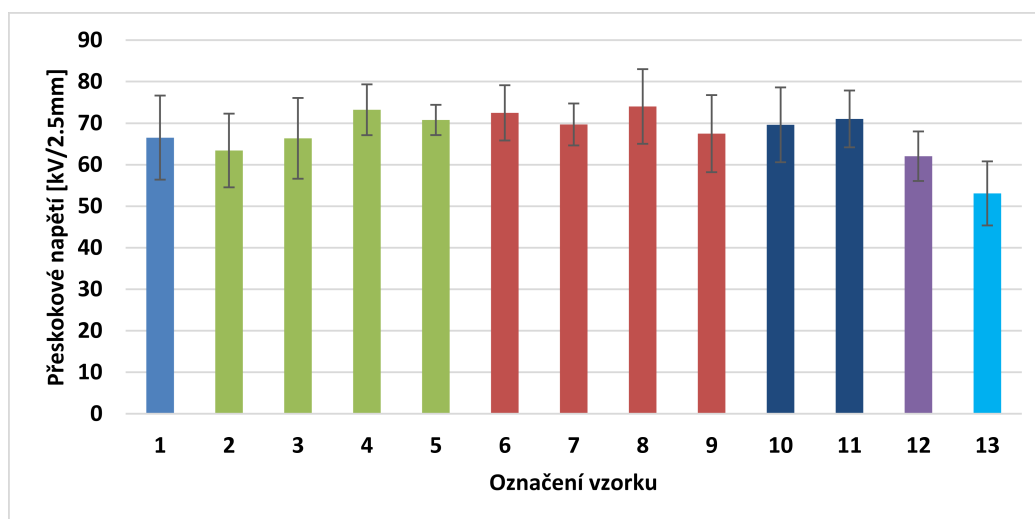
Tab. 7: Označení vzorků s antioxidanty

Antioxidant	Označení vzorku				
PG	Číslo	2	3	4	5
	Množství [% _{hm}]	0.05	0.1	0.25	1
BTHQ	Číslo	6	7	8	9
	Množství [% _{hm}]	0.1	0.25	0.5	1
PG s CA	Číslo	10		11	
	Množství [% _{hm}]	0.1 + 0.1		0.25 + 0.25	
BTHX	Číslo	12			
	Množství [% _{hm}]	1			
CA	Číslo	13			
	Množství [% _{hm}]	1			

6.4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Přeskokové napětí U_p

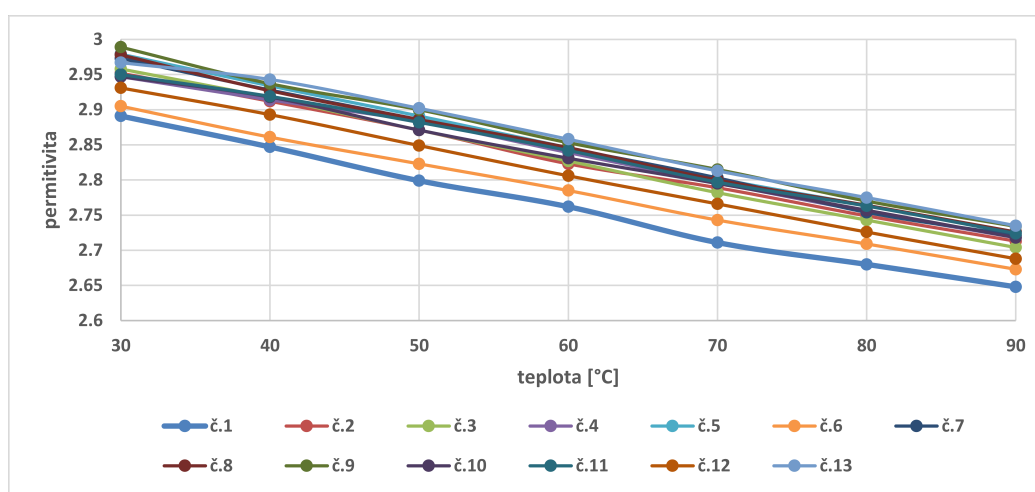
Přeskokové napětí bylo měřeno dle normy, s četností 6 přeskoků pro každý měřený vzorek. Jeho výsledky jsou uvedeny v Obr.16. Obecně lze říci, že antioxidanty ovlivňují velikost přeskokového napětí minimálně, krom vzorku č.13, u kterého se prokázal pokles hodnoty. Zbylé změny jsou v rámci směrodatné odchylky. Samotná směrodatná odchylka se zdá být vlivem antioxidantů v určité míře zlepšena. To platí hlavně o antioxidantech PG a BTHX, kde je směrodatná odchylka výsledků zřetelně menší.



Obr. 16: Výsledky přeskokového napětí

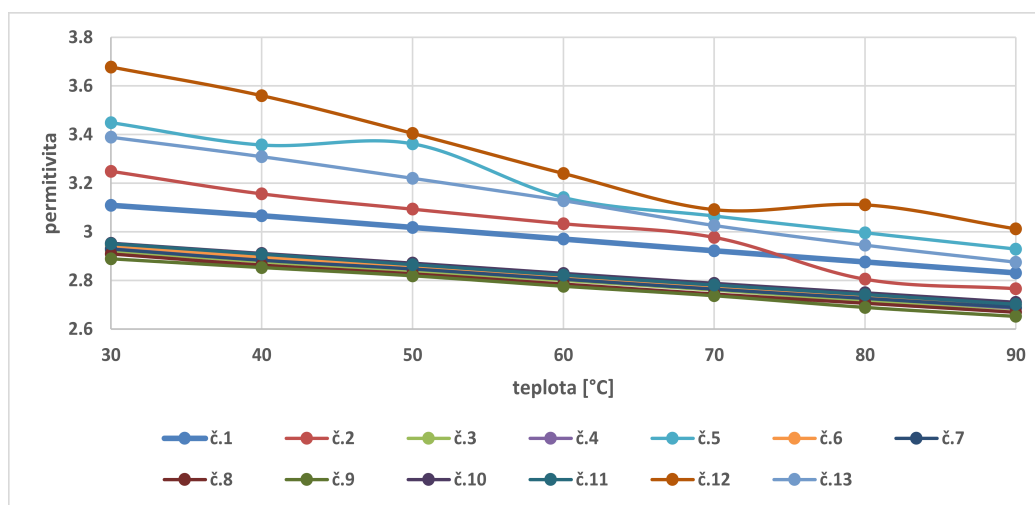
Permitivita

Zaznamenaným parametrem byla i permitivita a její tepelná závislost v rozsahu 30 až 90 °C. Dle grafu 17, který popisuje počáteční stav, nelze o vlivu antioxidantu říci mnoho. Jednoznačně lze pouze říci, že přidání antioxidantu zvýší permitivitu. Samotné zvýšení však není velké, jedná se zde o změnu v rozsahu jedné desetiny. Teplotní vývoj hodnot je stabilní a má stejný průběh jako křivka čistého oleje bez přísad.



Obr. 17: Teplotní závislost permitivity před TOS

Obr.18 ilustruje hodnoty permitivity po TOS, tedy teplotním stárnutí. Po něm se hodnota permitivity u čistého oleje zvýšila přibližně o jednu desetinu. Podobný, nebo vyšší, nárůst lze pozorovat u vzorků 2, 5, 12 a 13, tedy antioxidantů PG, BTHX a CA. U zbylých vzorků je hodnota permitivity nižší než u čistého oleje; v porovnání se stavem před teplotním stárnutím jsou hodnoty zvýšené pouze minimálně (do 0.1).



Obr. 18: Teplotní závislost permitivity po TOS

Vyhodnocení Testu Oxidační Stability

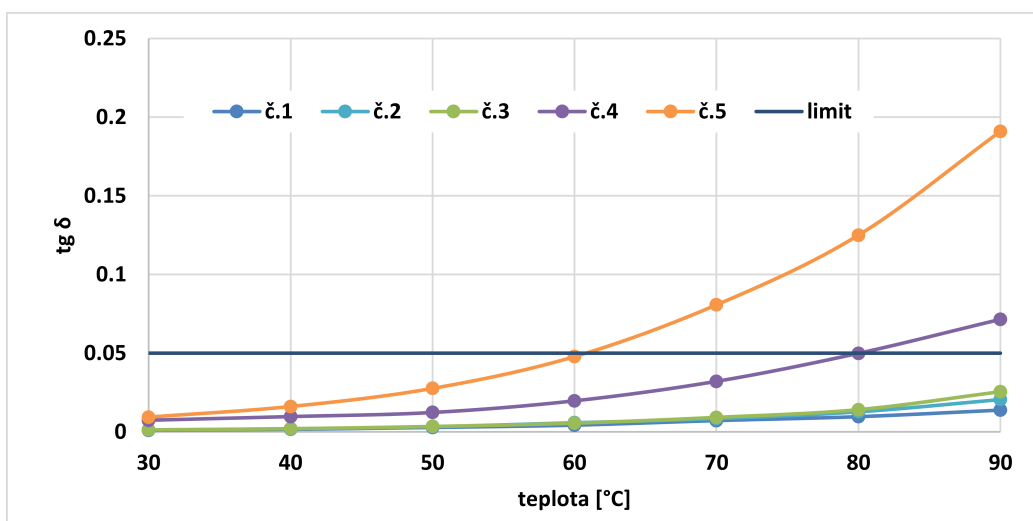
Již bylo řečeno, TOS se zakládá na měření ztrátového činitele. Výsledky jsou rozděleny do tří skupin, dle použitého antioxidantu.

První skupina (Obr.19) reprezentuje různé koncentrace (od 0.05 do 1 $hm\%$) antioxidantu Propyl gallate (PG). Je vidět, že vysoké koncentrace antioxidantu (0.25 a 1 $hm\%$) mají se splněním limitní hodnoty (0.05) pro $tg\ \delta$ v 90 °C, která je zde naznačena jako modrá vodorovná linka, problém. Jednoprocentní koncentrace překračuje tento limit dokonce téměř čtyřikrát. Tyto vzorky tedy musíme označit jako nevyhovující.

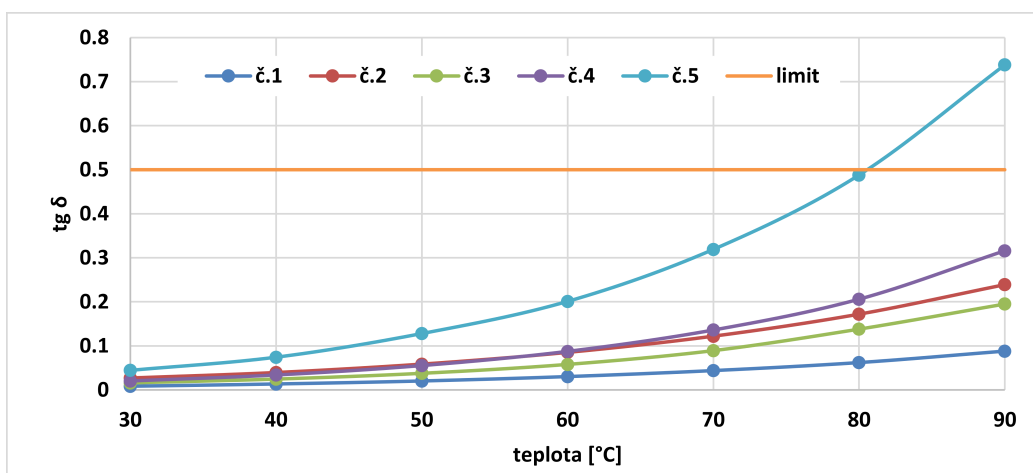
Situace po TOS ilustruje Obr.20. Je vidět, že problematický vzorek č.4 druhému limitu vyhověl; vzorek č.5 však i nyní nevyhověl limitní hodnotě a je tedy hodnocen jako zcela nevyhovující.

Pro praktické a názorné vyhodnocování výsledků testu oxidační stability byl vypočten *koeficient relativní rychlosti oxidace*, který jednoduchým číslem poměrově vyjadřuje změnu hodnot ztrátového činitele před a po TOS. Hodnoty pro

6 ZPOMALENÍ OXIDAČNÍCH PROCESŮ V ROSTLINNÉM OLEJI



Obr. 19: Ztrátový činitel před TOS, první skupina



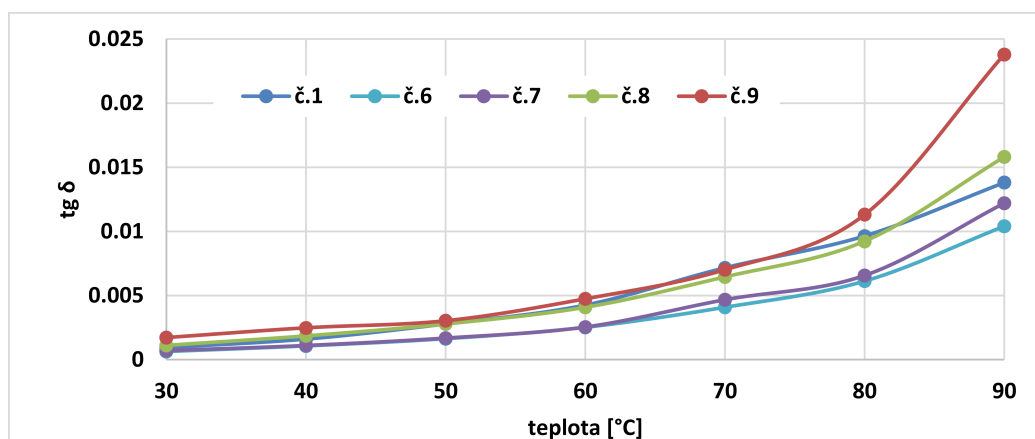
Obr. 20: Ztrátový činitel po TOS, první skupina

první skupinu jsou uvedeny v Tab.8. Menší hodnoty koeficientu než u čistého vzorku (č.1) značí zpomalení oxidačních procesů, větší koeficient pak horší, a tedy rychlejší rychlost oxidace. Je vidět, že vyšší obsah antioxidantu PG sice zlepšuje oxidační odolnost, avšak tyto koncentrace nevyhovují stanoveným limitním hodnotám.

Tab. 8: Výsledky ztrátového činitele, část 1

Číslo vzorku	1	2	3	4	5
tg δ před TOS	0.014	0.021	0.026	0.072	0.191
tg δ po TOS	0.088	0.239	0.195	0.316	0.738
Koeficient	6.384	11.659	7.647	4.420	3.864

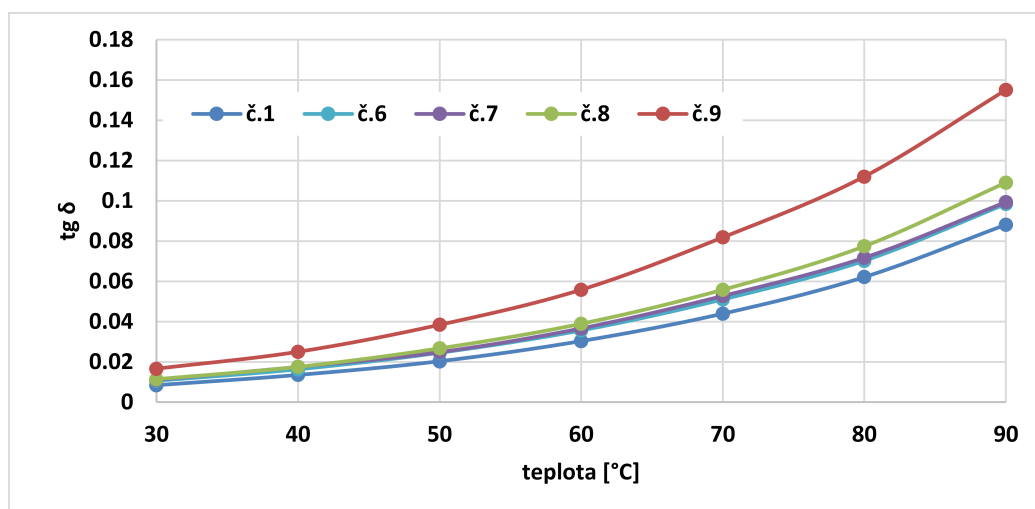
Druhá skupina popisuje výsledky antioxidantu BTHQ. Z Obr.21 je vidět, že žádná z koncentrací nemá s limitní hodnotou potíže.



Obr. 21: Ztrátový činitel před TOS, druhá skupina

Totéž platí i o situaci po TOS (Obr.22). S vyhověním limitu neměl problém ani jeden vzorek.

Hodnocení druhé části tedy padá na hodnoty koeficientu rychlosti oxidace (Tab.9). Ta však hovoří v neprospěch daných koncentrací antioxidantu BTHQ. Nejlepší hodnota koeficientu pro nejvyšší testovanou koncentraci 1 %_{hm} je stále horší, než pro čistý olej. Antioxidant BTHQ byl tedy v daných koncentracích vyhodnocen jako nevyhovující pro zvýšení oxidační stability.



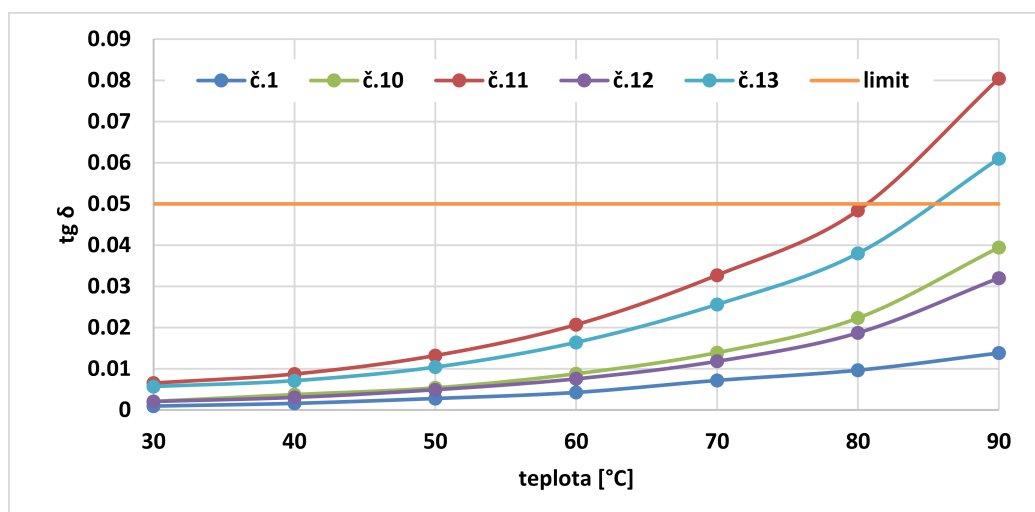
Obr. 22: Ztrátový činitel po TOS, druhá skupina

Tab. 9: Výsledky ztrátového činitele, část 2

Číslo vzorku	1	6	7	8	9
tg δ před TOS	0.014	0.010	0.012	0.016	0.024
tg δ po TOS	0.088	0.098	0.099	0.109	0.155
Koeficient	6.384	9.462	8.139	6.899	6.513

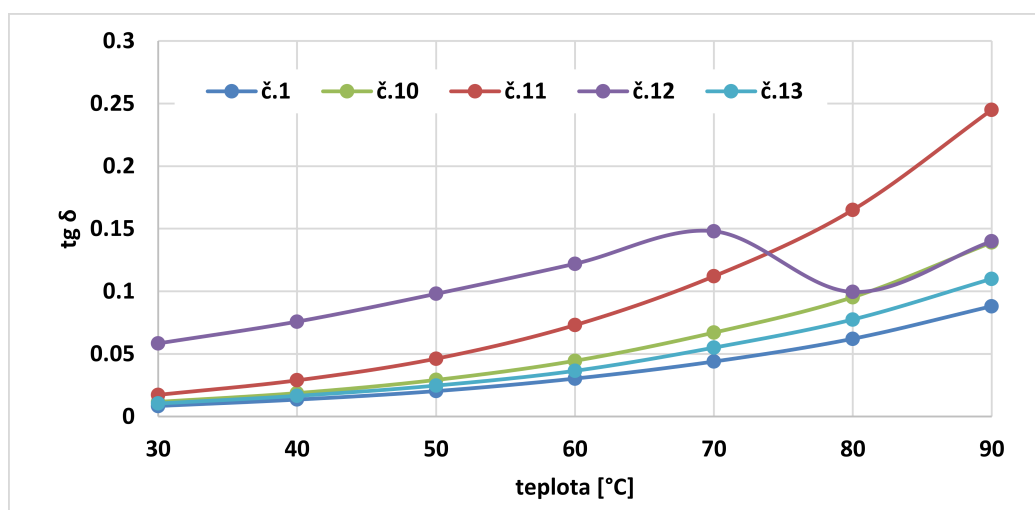
Poslední skupina zahrnuje ostatní vzorky, kterým nebyla věnována podobná pozornost jako prvním dvěma zástupcům antioxidantů. Vzorky 10 a 11 jsou mixy PG a CA o různých koncentracích, na kterých byl testován synergický efekt antioxidantů; č.12 je antioxidant BTHX a č.13 čistá kyselina citronová (CA). Situace na Obr.23 vypovídá následující: č.13 - antioxidant CA lehce překročil limitní hodnotu před TOS; č.11 - mix PG a CA o koncentracích 0.25 + 0.25 také překročil tento limit. Zbylé vzorky limit splnily bez problémů.

Situace po TOS je na Obr.24. Na první pohled je zřejmé, že limitní hodnotě vyhověly všechny vzorky. Zajímavý je pokles vzorku č.12, kdy na vyšších teplotách



Obr. 23: Ztrátový činitel před TOS, třetí skupina

tách poklesl ztrátový činitel. Podobně malý pokles lze u tohoto vzorku sledovat na grafu permitivity. Vysvětlení pro tento jev se však nenabízí, jelikož antioxidant byl použit pouze v tomto jednom vzorku a bez většího úspěchu.



Obr. 24: Ztrátový činitel po TOS, třetí skupina

Z hodnot koeficientu v Tab.10 je vidět, že celá třetí skupina vzorků byla benefiční pro námi použitý řepkový olej. Nejlepšího výsledku dosáhla kyselina citronová (CA), která má nejmenší koeficient 1.803, který značí, že tento vzorek po proběhlém teplotním stárnutí nebyl do značné míry ovlivněn. Absolutní hodnota je sice o několik setin vyšší, než u čistého oleje, avšak poměrová změna ztrátového činitele je několikanásobně menší. Dále byl prokázán synergický efekt u vzorků 10 a 11, kdy je vidět zlepšení oproti vzorkům o podobné koncentraci pouze antioxidantu PG.

Tab. 10: Výsledky ztrátového činitele, část 3

Číslo vzorku	1	10	11	12	13
tg δ před TOS	0.014	0.039	0.080	0.032	0.061
tg δ po TOS	0.088	0.139	0.245	0.140	0.110
Koeficient	6.384	3.528	3.047	4.375	1.803

Výsledky BDS

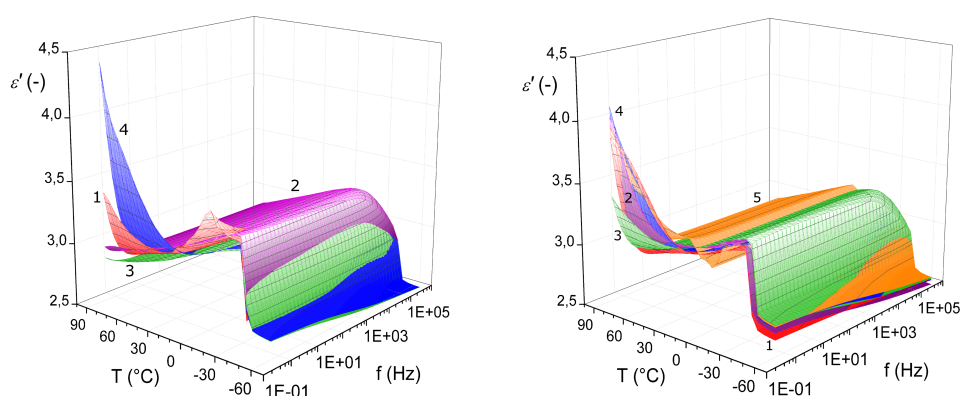
V rámci vyhodnocení proběhlo porovnávací měření tepelné a frekvenční závislosti ztrátového činitele a reálné části komplexní permitivity na pěti vzorcích. Jednalo se o zástupce čistého oleje a čtyři zástupce 1% koncentrace antioxidantů (viz. Tab.11). Měření probíhalo v teplotním rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$; ve frekvenčním rozsahu šlo o kmitočty 0.5 Hz až 1 MHz.

Naměřená data z BDS potvrzují výše uvedená tvrzení a rozšiřují je o komplexní pohled na frekvenční závislost. Z grafů reálné části permitivity (Obr.25) lze s rostoucí teplotou pozorovat pokles permitivity, což je způsobeno změnou hustoty vzorku. Co se týká vývoje parametrů ve frekvenčním pásmu, jedinou ob-

Tab. 11: Označení vzorků pro BDS

Označení	1	2	3	4	5
Antioxidant	žádný	PG	BTHQ	BTHX	CA

lastí s výraznějšími změnami je část s velmi nízkými frekvencemi, a většinou ještě ve spojení s vysokými teplotami, kdy hodnota permitivity vzrůstá.

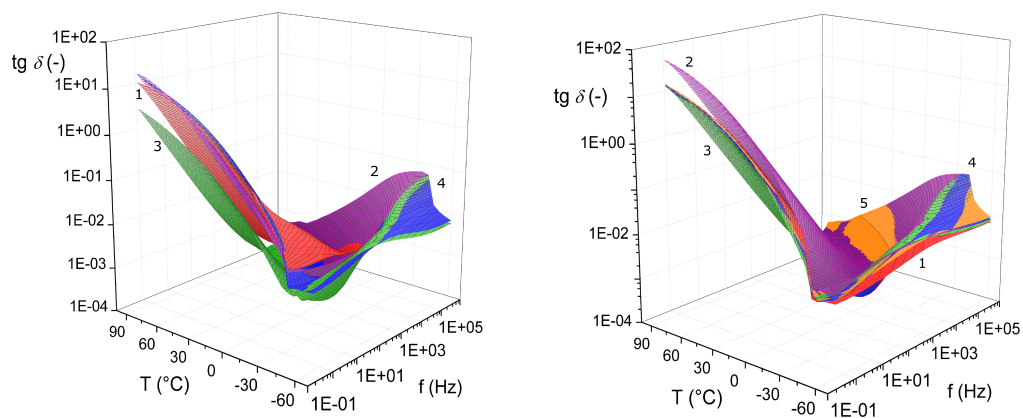


Obr. 25: 3D graf teplotně-frekvenční závislosti reálné části permitivity - před a po TOS

V případě závislosti ztrátového činitele (Obr.26) lze pozorovat následující. Lze sledovat postupný nárůst hodnoty ztrátového činitele se vzrůstající teplotou; tento růst je spojen s větším vlivem vodivosti oleje. Dále lze na grafech pozorovat tvorbu tzv. sedla, kde jsou hodnoty ztrátového činitele nejmenší. Dále lze říci, že se vzrůstající frekvencí roste i hodnota ztrátového činitele. Vývoj všech vzorků je podobný.

Obecně při pohledu na výsledky z BDS můžeme říct, že všechny vzorky mají podobný vývoj sledovaných parametrů. Další věcí, kterou lze z naměřených dat vyčíst, je prakticky skoková změna hodnoty permitivity v oblasti nízkých teplot

6 ZPOMALENÍ OXIDAČNÍCH PROCESŮ V ROSTLINNÉM OLEJI



Obr. 26: 3D graf teplotně-frekvenční závislosti ztrátového činitele - před a po TOS

(cca -20°C až -30°C) kdy dochází ke změně skupenství oleje, a tedy i změně měřených parametrů. Zajímavé jsou pak spíše lokální změny parametru jako např. sedlo ztrátového činitele a jeho spojitost s bodem tuhnutí apod.

VODA A JEJÍ INTERAKCE S ROSTLINNÝM OLEJEM

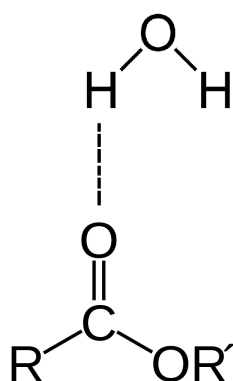
JEDNOU z rozdílných vlastností rostlinných olejů oproti minerálním je odlišná hodnota obsahu vody, jak uvádí základní přehled v kapitole 1.2. Tento rozdíl vychází z odlišného chemického složení rostlinných olejů. Hlavní pohnutkou v této oblasti je však morální nedostatek, který vysoká hodnota u těchto olejů, v porovnání s oleji minerálními, představuje.

7.1 VODA V SYSTÉMU ROSTLINNÝ OLEJ-PAPÍR

V první řadě je potřeba zmínit procesy a cesty, kterými se voda v oleji vyskytne. První možností je vznik vody chemickými reakcemi při degradaci celulózy. Druhou možností je pak vnik skrze špatně utěsněná těsnění nebo při špatně odvedené údržbě či jiné manipulaci s transformátorovou nádobou. Olej pak do sebe tuto vzdušnou vlhkost absorbuje dle své saturační kapacity a vlhkosti vzduchu, která má také vliv na rychlost absorpce (což potvrzuje např. Fofana [69]). [70]

Rozdíly v obsahu a saturaci vody v izolačním oleji pak závisí, jak bylo řečeno, na složení daného oleje. Voda je látka polární, která je chemicky přitahována k jiným polárním látkám. Minerální oleje jsou nepolární, tedy vodu přirozeně nepřitahují, ani do veliké míry neabsorbují. Jejich saturace se pohybuje okolo 55 ppm.

Rostlinné oleje, jakožto estery, obsahují množství esterových vazeb, které jsou polární. V jedné molekule esteru nalezneme tři esterové vazby, kdy každá na sebe dokáže navázat molekulu vody. To je naznačeno na Obr.27. Vazba probíhá skrze dvojinou vazbu mezi kyslíkem v esteru a vodíkem v molekule vody. Z toho tedy plyne, že množství vázané vody v rostlinných olejích bude vysoké, a též i hodnota saturace. Ta se pohybuje kolem 1100 ppm, jak je vidět z Tab.12. [23]



Obr. 27: Vazba vody na esterový řetězec

Tab. 12: Hodnoty saturace vody v různých olejích [23]

Druh oleje	Počet vazeb	Hodnota saturace při 23°C
Minerální	0	55
Silikonový	0	220
Přírodní ester	3	1100
Syntetický ester	4	2600

Na základě těchto hodnot můžeme mnohé říci o rovnováze obsahu vody v systému olej-papír. V běžném minerálním oleji (který sám o sobě vodu moc neabsorbuje) by se většina vody vázala v pevné, tedy papírové, části izolace. V té působí

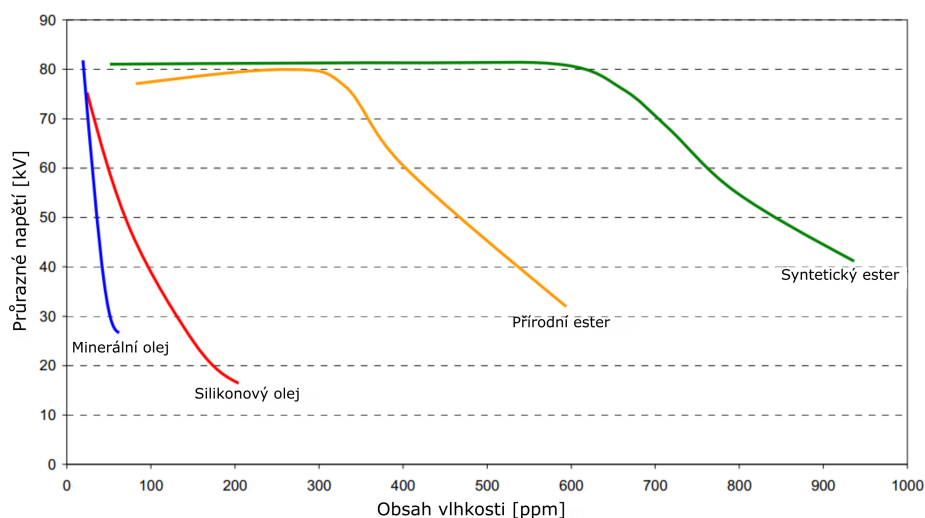
negativně, chemicky ho rozkládá a do oleje uvolňuje rozkladné látky, které dále degradují vlastnosti oleje. Celý systém tedy pozvolně degraduje. V případě regenerace takového oleje je potřeba ho zahřát tak, aby voda přešla do kapalně části, ze které ji lze odstranit při regeneračních cyklech. O těch je více pojednáno v kapitole 3.2.

V případě esterového oleje, a zde je to nejlépe vidět v případě retrofitu, jak popisují autoři v [29], se hodnota obsahu vody po naplnění esterovým olejem FR3 stabilizovala z prvotní hodnoty 50 ppm na 300 ppm během prvního roku provozu bez vlivu na průrazné napětí. Proběhlo tedy "vysušení" pevné části izolace, která zadržovala vodu od předchozí minerální náplně, což má pozitivní vliv na výslednou životnost pevné části izolace. Toto potvrzují i další aplikační data [71, 72].

7.1.1 *Mechanismy chování vody a jejího vlivu*

Koreh [73] a kolektiv při zkoumání minerálního oleje zjistil, že při obsahu vody do 10 ppm je obsažená voda ve formě samostatných molekul, kdy je molekula vody kompletně obklopena molekulami oleje, a je tedy zabráněno jejím vazbám. Nad tuto koncentraci je však blízkost molekul vody větší, a tedy začne i výskyt vazeb – začnou se formovat klastry vody. Takto to funguje až do saturačních hodnot jednotlivých olejů, po kterých se voda začne vyskytovat ve formě volné vody – kapiček v objemu oleje. V tomto stavu je již ohrožena elektroizolační schopnost oleje z důvodu zvýšené možnosti tvorby vodivých cest mezi místy s různým potenciálem. To je ilustrováno na následujícím příkladu vlivu vlhkosti na průrazné napětí, kdy po dosažení saturačních hodnot následuje strmý pokles. [23] Saturační hodnoty však nejsou stále, ale naopak se zvyšují s nárůstem teploty. [72]

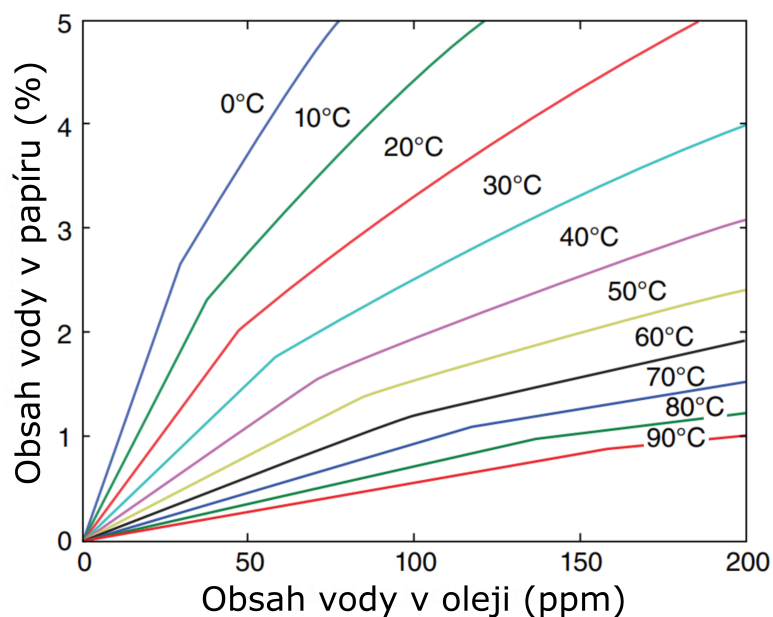
Přímým vlivem obsahu vody, krom oslabení elektroizolačních vlastností, je například zvýšená hodnota permitivity. [74] Její hodnota reflektuje efekt polarizač-



Obr. 28: Vliv vlhkosti na průrazné napětí, převzato [23]

ních jevů, které se s obsahem polárních nečistot samozřejmě zvyšují. Speciální polarizace, vyskytující se v celulóznicích látkách a ovlivňující ztráty při nižších kmitočtech, se nazývá β -relaxační polarizace, která je dle autorů v [74] způsobena celkovým pohybem vodou nasáklé papírové izolace či jejich částic (tato polarizace se tedy vyskytuje pouze při zvýšeném obsahu vody).

Hlavními akcelerátory stárnutí papírové části izolace jsou zvýšená teplota a zvýšený obsah vody. K tomu platí, že mezi obsahem vody v oleji a papírové části izolace existuje rovnováha, kterou se oba prvky snaží vždy zachovat. Tuto rovnováhu v případě přírodního esterového oleje ilustruje Obr.29. V případě stárnutí systému esterový olej-papír je hlavním degradačním činitelem voda generovaná chemickou degradací papíru, která dále přechází do esterového oleje, kde způsobuje hydrolýzu esteru. Hydrolýzou esteru se miní reakce vody s triglyceridy, kdy výslednými produkty jsou dlouhé řetězce mastných kyselin. V této reakci je spotřebovávána voda obsažená v esteru, což, pro dodržení rovnováhy, vyvolá další přesun vody z pevné části izolace do esterové kapaliny. Chemické produkty



Obr. 29: Rovnováha vody mezi přírodním esterovým olejem a papírem, převzato [36]

těchto procesů dále interagují s celulózu, čímž ji dále oslabují. Toto je sekundární degradační mechanismus nazývaný též transesterifikace. [36, 72]

Monitorování stupně degradace těmito procesy je proveditelné např. měřením čísla kyselosti, které je rozkladnými procesy zvyšováno.

Degradační mechanismy způsobené obsahem vody však nikdy nepůsobí samostatně, nýbrž působí společně, např. s ději oxidačními (popsanými v kapitole 6).

7.2 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ, MATERIÁLŮ A METODIKY

Z výše uvedeného přehledu lze vyčíst hlavní důvody pro tento experiment, a to morální nedostatek, který vysoká hodnota obsahu vody v přírodních esterech

představuje. Cílem experimentu bylo posouzení dielektrických vlastností vzorku přírodního esterového oleje se zvýšeným obsahem vody při současném působení zvýšené teploty jako akceleratoru degradačních procesů. Běžná experimentální měření zahrnují pouze jeden současně působící faktor – reálné prostředí transformátoru však představuje komplexní systém ve kterém je zahrnuta část vinutí (měď) a pevná část izolace (transformátorová lepenka) obklopující vinutí. Z tohoto důvodu bylo do experimentu zahrnuto působení všech materiálů najednou. Jako akcelerator degradačních procesů byla zahrnuta i tepelná expozice vzorků při různých úrovních teploty.

Hlavními sledovanými diagnostickými parametry byl obsah vody vzorku a číslo kyselosti, pro jejichž zjištění byl použit Coulometr WTD Diram využívající jódovou titraci dle Karla Fischera pro stanovení obsahu vody, a modul KOH, využívající coulometrické stanovení se spektrofotometrickou indikací na alkalickou modř B6, pro stanovení čísla kyselosti.

Z dielektrických parametrů bylo měřeno přeskokové napětí, a to pomocí vysokonapěťového zdroje o maximálním napětí 200 kV síťového kmitočtu, napěťový růst byl nastaven na 2 kV/s. Měření probíhalo dle ČSN EN 60156 [75] při vzdálenosti elektrod 2.5 mm. Dalšími parametry byly ztrátový činitel a rezistivita, jejichž měření byla prováděna na dielektrickém analyzátoru Tettex 2830/2831 s vhodným elektrodovým systémem 2903. Měření probíhalo dle ČSN EN 60247 [76] při napětí 500 V v teplotním rozsahu 30 až 90 °C.

Specifikace materiálů

Každý z dvanácti vzorků v tomto experimentu se sestával z 500 ml elektroizolačního oleje na bázi přírodního esteru – oleje ENVITRAFOL, založeném na řepkovém oleji, který byl vytvořen na našem pracovišti. Dále vzorek obsahoval trans-

formátorovou lepenku o rozměru 100x100 mm o tloušťce 0.2 mm a měděný plátek o rozměrech 140x15 mm tloušťky 0.1 mm. Vzorek s tímto složením byl uchováván v tmavé prachovnici opatřené uzávěrem pro zamezení přístupu vzduchu. Výchozí obsah vody oleje byl 92 ppm.

V rámci experimentu bylo pracováno s třemi úrovněmi vlhkosti; vzorky byly dle množství vody označeny jako "suché", "pokojové" a "vlhké". Různý stupeň vlhkosti byl do vzorku zaveden skrze papír, který byl, v případě "suchých" vzorků vysušen v peci po dobu 24 hodin při 85 °C; v případě "vlhkých" vzorků byl vystaven v klimatické komoře podmínkám 40 °C 70% RH po dobu 24 hodin; v případě vzorků označených jako "pokojové" byl papír ponechán bez úprav v běžných podmínkách zhruba 23 °C 47% RH po dobu 168 hodin. V tabulce 13 je vidět hmotnostní rozdíl po temperování, oproti stavu před ním (respektive oproti "pokojovým" vzorkům, jejichž hmotnost byla průměrně 6 g). Tento hmotnostní rozdíl lze přičíst přidané nebo vysušené vodě.

Tab. 13: Průměrný hmotnostní rozdíl ve vzorku papírové lepenky

Suchý papír	Vysušená voda (g)	0.1867
Vlhký papír	Přidaná voda (g)	0.1136

Číslování vzorků

Vytvořený vzorek s různým stupněm vlhkosti byl poté vystaven tepelné expozici po rozdílnou dobu. K orientaci mezi použitými vzorky a úrovní tepelné expozice slouží Tab.14.

Cílem rozdílné doby tepelné expozice bylo vystavit každý vzorek výslednému stejnému namáhání, respektive porovnat účinky různých dob trvání a úrovní na

Tab. 14: Označení vzorků v experimentu a doba tepelné expozice

Expozice	23 °C	120 °C	140 °C	160 °C
Suchý	1000 h	1450 h	1200 h	1600 h
Pokožový	1000 h	1450 h	1200 h	1600 h
Vlhký	1000 h	1450 h	1200 h	1600 h

obsah vody a další sledované parametry. Vzorky ponechané při pokojové teplotě sloužily pro porovnání jako olej, který je vystaven stejným vlivům kromě provozního, který zde představovala zvýšená teplota.

7.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Před započítí vlastních měření byl ze vzorků vyjmut měděný pásek spolu s papírovou lepenkou, a to co nejdříve po vyjmutí z pece tak, aby bylo zabráněno návratu vody z oleje do papíru při chladnutí. Dále se tedy pracovalo pouze s čistým olejem, který byl měřen co nejdříve po vychladnutí na pokojovou teplotu, zatímco byl stále uzavřen v nádobách pro co nejvyšší omezení kontaminace vzdušnou vlhkostí.

Obsah vody a číslo kyselosti

Vlastní obsah vody v oleji na počátku měření byl 92 ppm. Toto je tedy výchozí hodnota pro následující vyhodnocení stavu vzorků. Hodnoty obsahu vody a čísla kyselosti, spolu s rozdílem oproti výchozímu stavu, jsou vidět v Tab. 15

Tab. 15: Označení vzorků v experimentu a doba tepelné expozice

Vzorek & expozice	Obsah vody (ppm)	Změna vody (ppm)	Číslo kyselosti (mg KOH/g)
Suchý 23 °C	80	-12	0.010
Suchý 120 °C	332	240	0.043
Suchý 140 °C	108	16	1.537
Suchý 160 °C	220	128	1.836
Pokožový 23 °C	143	51	0.010
Pokožový 120 °C	499	407	0.154
Pokožový 140 °C	113	21	2.147
Pokožový 160 °C	246	154	2.528
Vlhký 23 °C	305	213	0.034
Vlhký 120 °C	502	410	0.271
Vlhký 140 °C	226	134	4.047
Vlhký 160 °C	534	442	3.931

Nejprve se zaměříme na stav vzorků ponechaných při pokojové teplotě (23°C). V případě suchého vzorku je vidět absorpce vody do papíru, a tedy zlepšení vlastního obsahu vody v oleji. V dalších dvou případech je již vidět nárůst obsahu vody v oleji, a také malý nárůst čísla kyselosti, který je spjat s degradačními ději způsobenými hlavně přidaným plátkem mědi, který zapříčiňuje akceleraci těchto procesů.

U ostatních vzorků se vcelku potvrdil předpoklad o různě velkém přestupu vlhkosti z různě navlhle transformátorové lepenky do vzorku. Největší nárůst obsahu vody byl vidět u vzorků vystavené tepelné expozici 120 °C, a to především z důvodu nejdelší doby expozice (1450 h); hodnota obsahu vody se ustálila

bezmála na 500 ppm u všech tří vzorků. Tyto hodnoty však neznamenají rozsáhlé degradační procesy, což je jasné z pohledu na číslo kyselosti, které se drží velmi nízko. Je tedy zřejmé, že teplotní expozice 120 °C není dostatečně vysoká na to, aby způsobila zásadní degradaci oleje.

Oproti tomu vzorky vystavené 140 °C vykazují sice nízký nárůst obsahu vody (dva ze tří nepřekročily 120 ppm což je u esteru velice dobrá hodnota, srovnatelná s 15-20 ppm u minerálních olejů), nicméně z pohledu na vysoká čísla kyselosti jsou jasně zřetelné značné dopady degradačních procesů. Podobné závěry lze vyvodit u i poslední sady vzorků, kde nejenom rostla hodnota čísla kyselosti, ale i obsahu vody.

Závěrem je zde tedy fakt, kdy, i v situaci s rozvinutými degradačními procesy s vyšším množstvím přidané vlhkosti do systému, má tento rostlinný olej stále dostatečnou kapacitu na absorpci další vody, jelikož je stále hluboko pod svou saturační hodnotou.

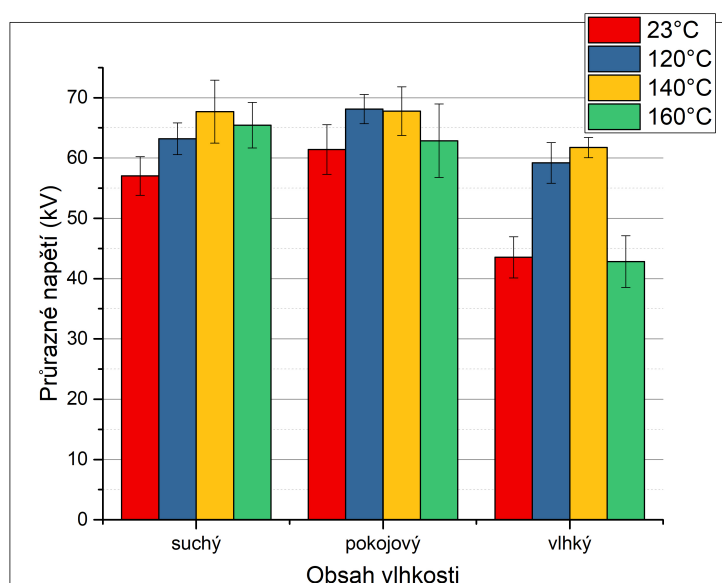
Dielektrické parametry

Z dielektrických parametrů je prvním hodnota průrazného napětí. Výsledky jsou uvedeny v Obr.30. Z výsledků je vidět potvrzení výše uvedených předpokladů o možnostech absorpce vody přírodních esterů a jejího vlivu na průrazné napětí.

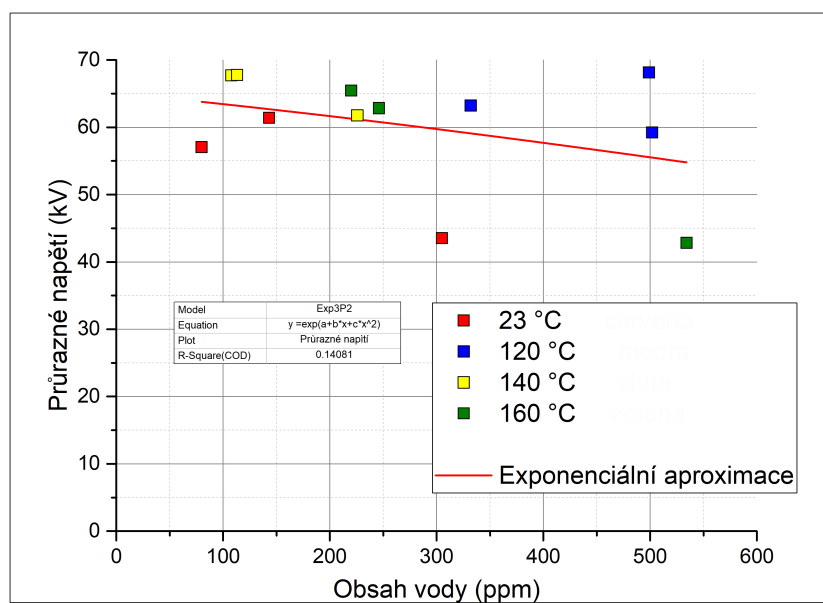
Získaná data mají podobný průběh jako závěry uvedené např. v CIGRE 436 [23], viz. Obr.28. Největší pokles, jak je z grafu vidět, vykazují "vlhké" vzorky s obsahem vody 305 a 502 ppm.

Lepší přehled však získáme z pohledu na závislost průrazného napětí na absolutním obsahu vody, který je zobrazen na Obr.31. Z proložené křivky exponenciální náhrady je z naměřených dat vidět prakticky lineární pokles hodnot; tento pokles však není rapidní – maximální naměřená hodnota je 68 kV, nej-

7 VODA A JEJÍ INTERAKCE S ROSTLINNÝM OLEJEM



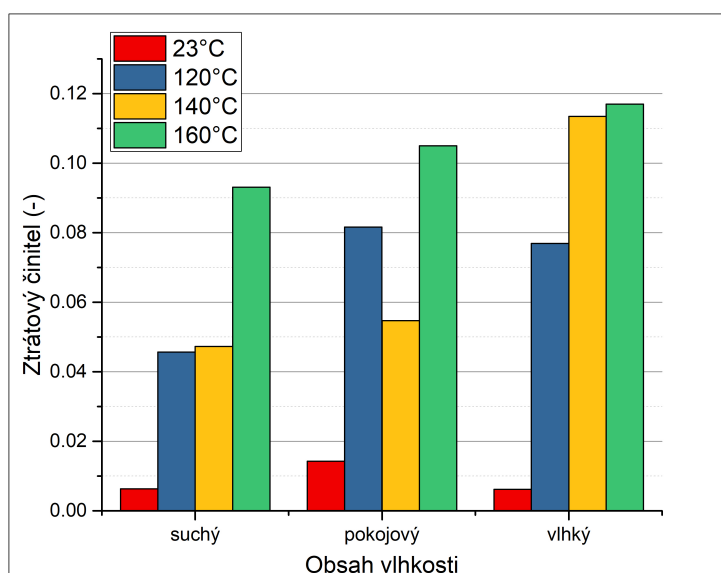
Obr. 30: Hodnoty průrazného napětí při různém stupni vlhkosti a tepelné expozice



Obr. 31: Závislost průrazného napětí na obsahu vody

nižší pak 43 kV. Variační koeficient měření pak byl nejvýše 19 %, a to v případě vzorku "vlhký" při expozici 160 °C, tedy vzorku vystavenému nejvyššímu stupni degradačního vlivu. Norma ČSN EN 62770 [25], konkrétně pak IEC 60156, stanoví minimální hodnotu průrazného napětí nepoužité izolační kapaliny na bázi přírodních esterů na minimálně 35 kV/2.5mm; lze tedy říci, že všechny vzorky z hlediska průrazného napětí vyhověly, a to i dle normy pro čisté, nepoužité kapaliny.

Výsledky ztrátového činitele $\tan \delta$ jsou prezentovány na Obr.32. Pro větší rozdíly jsou srovnávány hodnoty při 90°C.

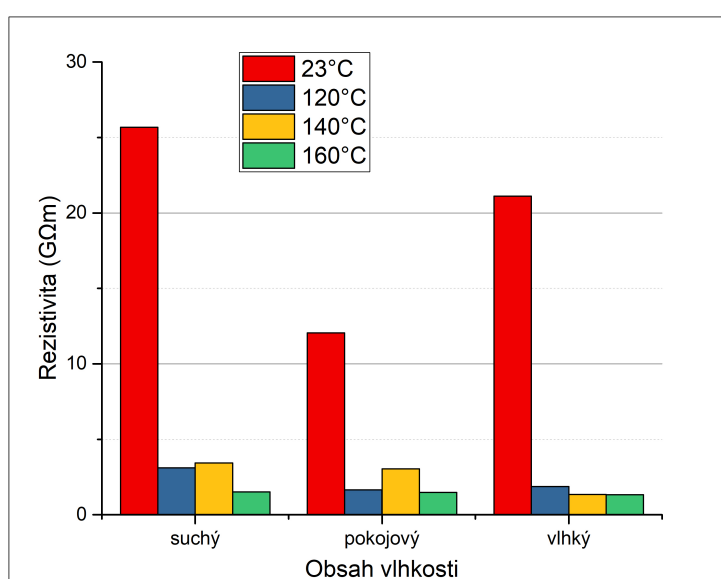


Obr. 32: Výsledky ztrátového činitele při 90°C

Primárním faktorem pro zvýšení ztrátového činitele se ukázal obsah vody, sekundárním faktorem pak bylo číslo kyselosti. Důležitou roli však hrála také samotná teplotní expozice, která urychluje degradační procesy. "Mokrý" vzorek ponechaný při pokojové teplotě nevykazuje zvýšení ztrátového činitele i přes svou vyšší hodnotu obsahu vody; číslo kyselosti však bylo prakticky beze změny,

neproběhla tedy synergická součinnost degračních dějů které by mohly být detekovány diagnostickými veličinami, a ty tedy zůstaly beze změny. Limitním faktorem ztrátového činitele, dle výše zmíněné normy ČSN EN 62770, je hodnota 0.05. Zde již limit překračují hlavně všechny vzorky vystavené expozici při 160°C, dále pak většina vystavených 140 °C a 120 °C.

Z výsledných hodnot rezistivity (Obr.33) je pak vidět značný pokles hodnot, nicméně stále se jedná o hodnoty v řádu $G\Omega \cdot m$. Tento pokles je běžným účinkem jakékoliv tepelné expozice.



Obr. 33: Výsledky rezistivity při 90°C

VLIV NANOČÁSTIC NA VLASTNOSTI ESTEROVÉ KAPALINY

PRVNÍ experimenty s přidáním nanočástic do transformátorových olejů proběhly po roce 2008 [37, 77, 78]. Jednalo se hlavně o kombinace minerálních olejů s částice TiO_2 . Jejich cílem bylo, jakož převážně i dnes, zlepšení dielektrických parametrů, a to hlavně průrazného napětí. Důvodů pro použití je víc, avšak je zde i mnoho problémů, které jejich nasazení přináší, jako například kompatibilita s vlastním olejem, aglomerace, cena a, prozatím neznámý, dlouhodobý vliv na životnost celého elektrického stroje.

8.1 PROBLEMATIKA POUŽITÍ NANOČÁSTIC

Hlavní motivací pro použití nanočástic ve spojení s transformátorovým olejem je stále vylepšení dielektrických parametrů, a to hlavně průrazného napětí. Převažující teorie je, že se nanočástice zachovají jako elektronové pasti, což ovlivní tvorbu vodivého kanálu při hrozícím výboji. [78] Tyto rychlé elektrony se průchodem v okolí vodivých nanočástic výrazně zpomalují, což velkou měrou omezuje tvorbu lokálního náboje v okolí hrotu výbojového kanálu, který díky tomu ztrácí na energii, a tedy pozastavuje svůj další vývoj. [79]

Dle vodivosti rozlišujeme nanočástice na tři druhy, a to vodivé (např. Fe_3O_4), částečně vodivé (TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3) a nevodivé (Al_2O_3 , SiO_2). Volba druhu částice má výrazný vliv na výsledné parametry, např. hodnotu průrazného napětí, které dokáže ovlivnit až o 30 %. [80, 81]

Další výhoda nanočástic spočívá v jejich rozměrech, konkrétně poměru aktivního povrchu částice ku jejímu objemu. Čím menší částici máme, tím větší je její relativní povrch, tedy reaktivní plocha kterou ovlivňuje své okolí. [82, 83] Menší rozměry poskytují také další výhodu v lepší stabilitě výsledné nanokapaliny, jelikož na částici působí menší interakční síly, a mají tedy menší tendence k aglomeraci. K té přispívá také vysoká koncentrace nanočástic, což potvrzují experimentální data, kdy lepších výsledků bylo dosaženo s menšími koncentracemi. [84] Ty totiž znamenají menší pravděpodobnost vzájemných srážek vedoucích k tvorbě aglomerátů, které mohou dosáhnout velikosti o několik řádů vyšších (desítky či více μm). [82, 85]

Samotná aplikace nanočástic však nepřináší pouze benefity, ale představuje nové problémy spojené s jejich aplikací. Problematická je například aglomerace a sedimentace částic, což jsou faktory ovlivňující dlouhodobou použitelnost těchto kapalin. Při výběru vhodné nanočástice je potřeba provést komplexní výběr druhu a velikosti nanočástic a vhodné povrchové úpravy tak, aby byla zaručena dlouhodobá kompatibilita s použitou elektroizolační kapalinou. [80]

Podmínkou pro stabilní nanokapalinu jsou homogenně dispergované nanočástice. Ty zůstanou dispergované pokud budou přitažlivé Van der Waalsovy síly kompenzovány silami odpudivými (respektive působícími proti silám přitažlivým) jako jsou síly elektrostatické, stérické nebo elektro-stérické. Tyto síly jsou pro stabilitu důležité, protože představují bariéru, kterou částice musí překonat aby mohly interagovat a vytvářet aglomeráty s jinými částicemi. Pokud je ener-

gie této bariéry větší než kinetická energie částice, pak zůstane roztok stabilní a homogenně dispergovaný. [80, 85]

V praxi se pro zlepšení stability nanočástic používají surfaktanty, tedy povrchové úpravy, které snižují povrchové napětí v kapalině působením na rozhraní mezi částicí a kapalinou. Toto rozhraní brání působícím silám (hlavně stericke) ve vytváření vazeb mezi částicemi. [85] Při použití povrchové úpravy je však potřeba vybrat vhodný druh na základě dané aplikace (ne všechny surfaktanty vhodně interagují s danou kapalinou) a poté správné množství, jelikož příliš velké množství povrchové úpravy působí negativně – vytvoří kolem částice "bublinu", která bude snadno zachytávat okolní částice, což opět vede k vytváření aglomerátů. [80, 85]

Z výše uvedeného se nabízí několik oblastí pro výzkum. Dále prezentovaný experiment byl navržen s cílem ověřit důležitost povrchové úpravy nanočástic z hlediska dlouhodobé použitelnosti. Z toho důvodu bylo také provedeno měření reálné distribuce nanočástic.

8.2 POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ, MATERIÁLŮ A METODIKY

Vzhledem k vývoji v oblasti přírodních esterových transformátorových olejů, který přirozeně sleduje trendy minerálního oleje, je výzkum problematiky použití nanočástic ve spojení s přírodními estery jen dalším logickým krokem. Přídavnou otázkou je však biodegradabilita výsledné nanokapaliny.

Další náročnou problematikou je dlouhodobá použitelnost olejů s nanočásticemi. Běžným problémem je aglomerace a následná sedimentace částic, což vede minimálně k neefektivnímu využití použitých částic. Většina výzkumných prací se zaměřila pouze na okamžité výsledky [37, 84, 86], nicméně vyskytují se i jisté výsledky v oblasti dlouhodobé použitelnosti [87].

Dále prezentovaný experiment se snaží zodpovědět některé z nastolených otázek v oblasti přírodního esterového oleje ve spojení s nanočásticemi se zaměřením na důležitost povrchové úpravy, jejího vlivu na distribuci a dlouhodobou stabilitu dispergovaných částic.

Hlavními diagnostickými parametry byl ztrátový činitel $\tan \delta$, jehož tepelná závislost byla měřena na dielektrickém analyzátoru Tettex 2830/2831 s vhodným elektrodovým systémem 2903. Měření probíhalo dle ČSN EN 60247 při napětí 500 V v teplotním rozsahu 30 až 90 °C. Pro měření ve frekvenčním spektru 0.10 Hz až 10 kHz byl použit IDAX 350 s příslušným elektrodovým systémem.

Pro měření reálné distribuce částic v nanokapalině byl použit Dispersion Technology DT-1200, což je spektrometr pro zjišťování disperze v kapalných vzorcích pracující na akustickém a elektroakustickém principu. Měřicí sonda vysílá do měřicí komory skrze piezočlen sérii vysokofrekvenčních signálů o kmitočtech 1-100 MHz, které se šíří vzorkem k detektoru na opačné straně. Principiálně se jedná o vysílání krátkovlnných paketů o úzkém kmitočtu skrze měřené spektrum. Měřenými parametry jsou útlum, rychlost a zpoždění signálu. Vzdálenost mezi vysílacím a přijímacím členem je proměnná od 0.1 do 21 mm, což přispívá k většímu rozsahu měření disperze.

Specifikace materiálů

Základní složkou byl běžný řepkový olej, jehož vlastnosti jsou uvedeny v Tab.16. Jedná se o zástupce běžně dostupného oleje v centrální Evropě, jenž byl zvolen na základě předchozích experimentů.

Druhou složkou byly nanočástice MgO o průměrné velikosti 20 nm a permitivitě 5.5 od dodavatele US Research Nanomaterials.

Tab. 16: Vlastnosti řepkového oleje

Hustota [g/cm^3]	0.9211	Viskozita při 40°C [cSt]	35.7
Průrazné napětí [$kV/2.5mm$]	51.19	Permitivita [-]	2.992
$tg \delta$ při 90°C [-]	0.015	Rezistivita [$\Omega \cdot cm$]	$9.45 \cdot 10^7$

Nejdůležitější částí však byly tři druhy povrchových úprav, jejichž vliv byl hlavním bodem experimentu. Surfaktant, tedy povrchově aktivní látka, má za úkol bránit kongregaci nanočástic dispergovaných v kapalině. Jednalo se o práškový polymerový dispersant (označen jako S1), surfaktant pro esterové disperze (značen S2), oba od dodavatele US Research Nanomaterials; třetím surfactantem byla kyselina olejová (označen jako S3) od Sigma Aldrich.

Číslování vzorků

Z výše uvedených materiálů byly vyrobeny tři sady vzorků s různými koncentracemi nanočástic MgO, kde v každé sadě byl zastoupen vzorek s výše uvedenou povrchovou úpravou spolu se vzorkem bez modifikací. Přehled a označení vzorků je uveden v Tab.17. Vzorek No označuje čistý řepkový olej.

Tab. 17: Přehled označení experimentálních vzorků

Koncentrace	Surfaktant			
	S1	S2	S3	žádný
1.0 g/l	N1	N2	N3	N4
1.5 g/l	N5	N6	N7	N8
2.0 g/l	N9	N10	N11	N12

Příprava vzorků (jeden vzorek obsahoval 200 ml oleje) probíhala ve dvou fázích. První fáze obsahovala vlastní esterovou kapalinu, která byla dlouhodobě vysušována v peci při teplotě 60 °C. Druhá fáze obsahovala přípravu nanočástic s povrchovou úpravou. Navážené nanočástice byly smíchány s 96% etanolem, do kterého byla poté přidána povrchová úprava v množství přibližně 0.25% hmotnostního podílu nanočástic. Tato směs byla umístěna na magnetickou míchačku a zahřívána minimálně po dobu 10 minut pro proběhnutí potřebných reakcí a odpaření přebytečného etanolu. Dalším krokem k zajištění lepší disperze částic bylo použití ultrazvukové jehly po dobu 20 minut. Takto připravené upravené nanočástice byly vmíchány do esterového oleje na magnetické míchačce při zvýšené teplotě, a poté byla opět použita ultrazvuková jehla.

Tento způsob přípravy vzorku (dvoukroková metoda) byl založen na zkušenostech z výše zmiňované odborné literatury. Rozdíly a problematikou způsobu přípravy vzorků jednokrokovou a dvoukrokovou metodou se zabývá např. [85].

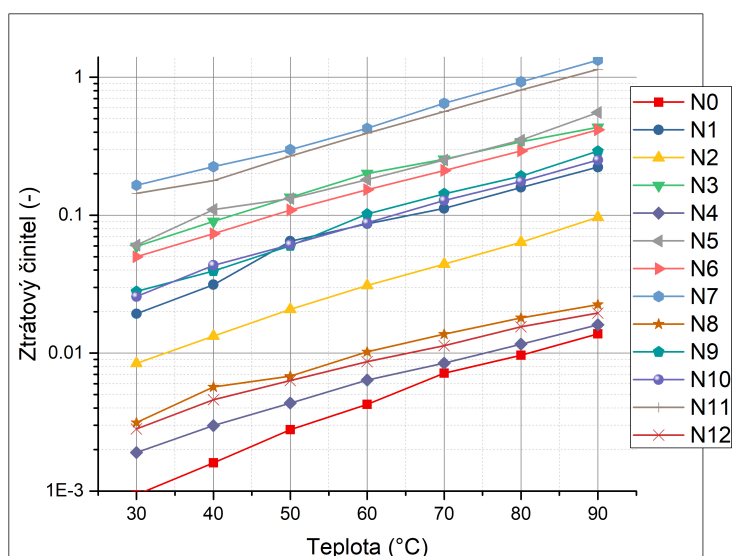
8.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Výsledky měření ztrátového činitele

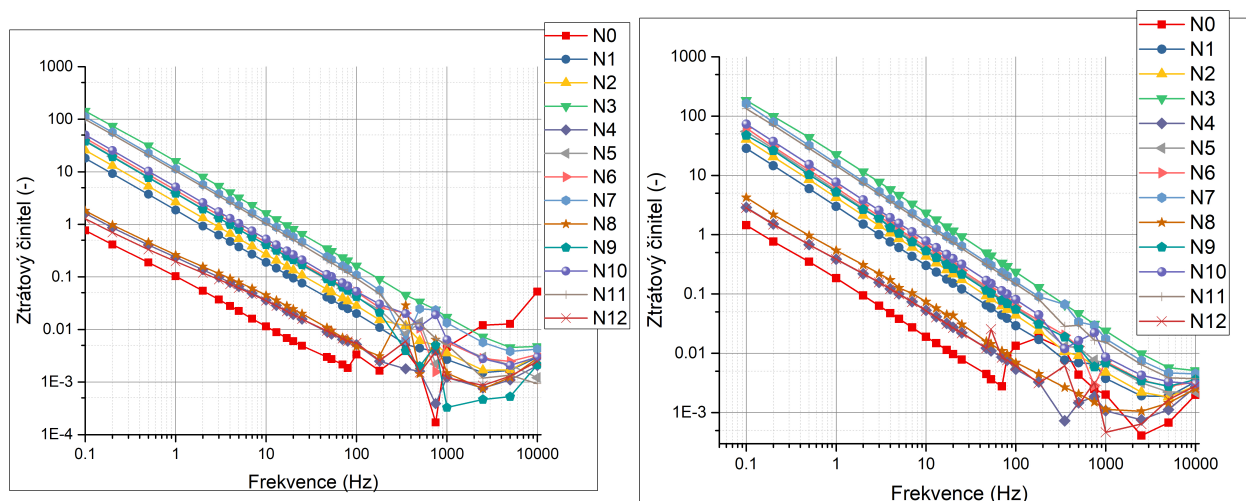
První sada výsledků zahrnuje závislosti ztrátového činitele, nejprve jeho teplotní závislost (Obr.34). Prvotně viditelným výsledkem je negativní vliv nanočástic MgO na hodnotu ztrátového činitele. Toto dokládají výsledky pro vzorky N₄, 8 a 12, což jsou vzorky bez surfaktantu.

Zajímavější výsledky jsou však vidět ve frekvenčním spektru, které bylo měřeno při různých teplotách, viz. Obr.35 a 36.

Průběhy frekvenčních závislostí mají očekávaný průběh, kdy s rostoucí frekvencí klesá ztrátový činitel. Nejnižší hodnotu má opět čistý olej, jehož závislosti



Obr. 34: Teplotní závislost ztrátového činitele

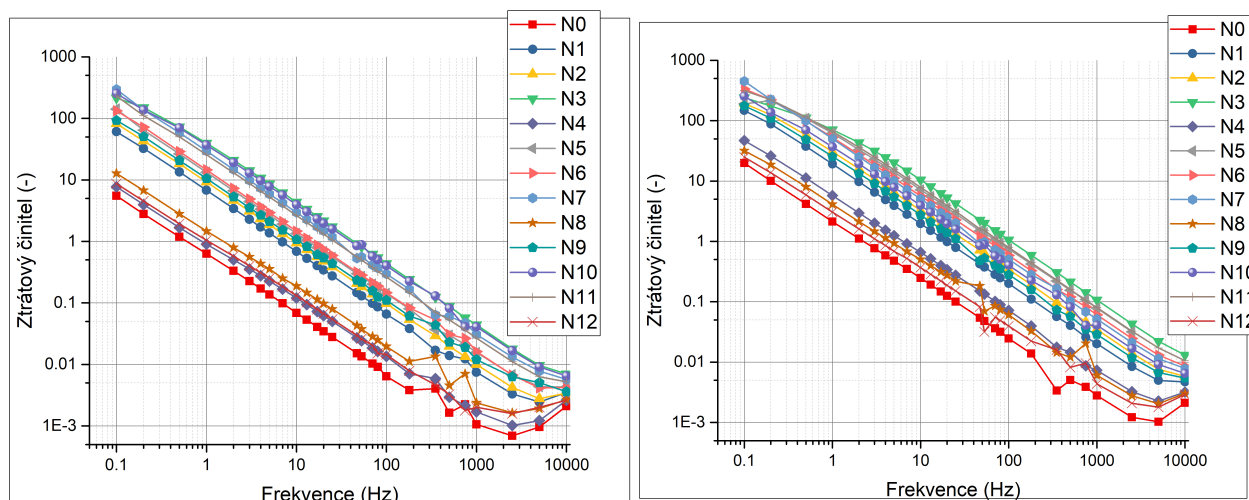


Obr. 35: Frekvenční závislosti ztrátového činitele při 25 a 40°C

se přibližují hodnoty u vzorků N₄, 8 a 12, tedy vzorky bez přidané povrchové úpravy. Důležitá je část spektra mezi 100 Hz a 1 kHz, kde jsou viditelné špičky, které mohou odpovídat přírůstkům od relaxačních polarizací. Tyto špičky se však neobjevují u všech vzorků, ale pouze u vzorků s nanočásticemi bez povrchové

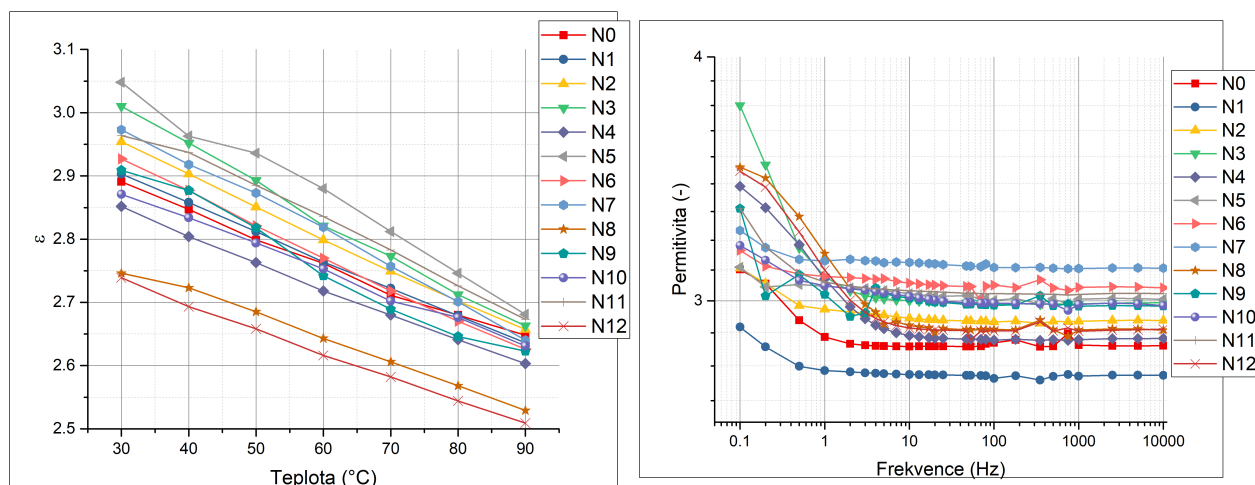
úpravy. Důvodem může být působení surfaktantu, nebo částečně úroveň ztrát, ve které je rozdíl i jeden řád.

Na dalších závislostech, tentokrát pro teploty 60 a 80°C (Obr.36), je vidět podobný průběh. Ztrátový činitel pro tyto vyšší hodnoty teplot narůstá, a jeho závislosti vykazují nižší odchylky. Nejhůře, tedy největší zvýšení hodnot, vykazují vzorky se surfaktantem S3. Vzorky s použitými surfaktanty S1 a S2 vykazují podobný trend.



Obr. 36: Frekvenční závislost ztrátového činitele při 60 a 80°C.

Naměřené tepelné a frekvenční závislosti permitivity jsou zobrazeny na Obr.37. Na první pohled je vidět rozkol ve výsledcích, kde při měření teplotní závislosti vychází u vzorků bez povrchové úpravy nižší hodnoty než pro čistý olej, ostatní vzorky prokazují mírný nárůst. Změna je však v rámci desetinných míst. U měření frekvenční závislosti však i tyto vzorky mají permitivitu vyšší než čistý olej, stejně jako všechny ostatní vzorky. Tuto odchylku mezi měřicími metodami lze přisoudit použití jiných elektrodoých systémů, kde každý pracuje při měření s jiným obsahem vzorku.

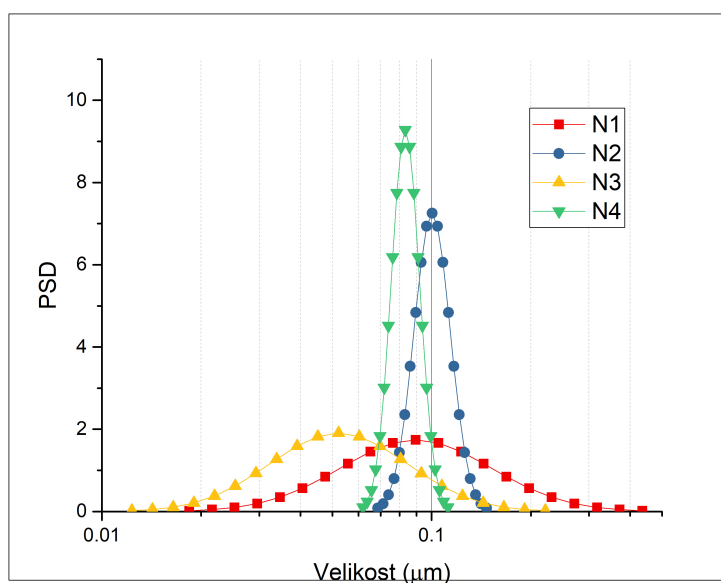


Obr. 37: Teplotní a frekvenční závislost permitivity

Vyhodnocení disperze

Druhá část experimentu se zabývala měřením disperze a účinku povrchové úpravy na ni. Tato měření byla provedena pouze pro první sadu vzorků s nejmenší koncentrací (1 g/l) s cílem ověření funkčnosti různých povrchových úprav aplikovaných na použité nanočástice. Naměřené hodnoty jsou prezentovány na Obr.38. Osa x reprezentuje velikost částic v závislosti na parametru PSD (particle size distribution), tedy distribuci zastoupení částic dle velikosti. Ideálním výsledkem grafu by byla ostrá špička nad velikostí jedné nanočástice (20 nm), která by byla zvětšena (v grafu posunuta doprava) o navázanou povrchovou úpravu, bez dalšího zastoupení na jiných rozměrech.

Rozdíl mezi vzorky je značně viditelný. Vzorky N1 a N3 nemají zřetelně zastoupenou jednu velikost částic, nýbrž mají velikosti částic distribuované přes celé spektrum, čemuž odpovídají nízké hodnoty PSD. Vzorky N2 a N4 vykazují jasně rozpoznatelné křivky, charakterizující velikost částic, která je v daném vzorku



Obr. 38: Disperze vzorků po namíchání

výrazně zastoupena. Zde můžeme tvrdit, že disperze je koherentní s hodnotou kolem 90 nm.

Pro objektivní hodnocení byly vyhodnoceny parametry FWHM (Full Width at Half Minimum), což je šířka spektrální křivky mezi body s poloviční amplitudou a centroid, což je zde nejčastější velikost částice z naměřené disperzní křivky. Oba parametry jsou uvedeny v Tab.18.

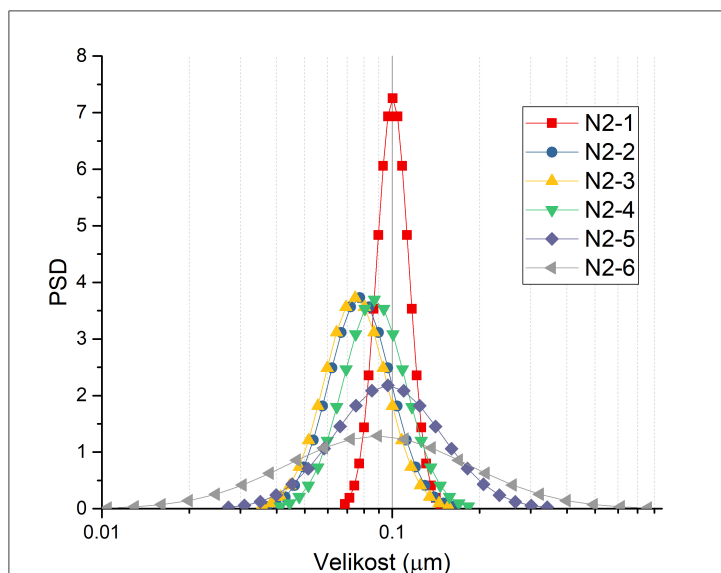
Tab. 18: Hodnoty disperze po rozmíchání

Vzorek	FWHM [μm]	Centroid [μm]	Vzorek	FWHM [μm]	Centroid [μm]
N1	0.118	0.089	N3	0.062	0.052
N2	0.030	0.102	N4	0.019	0.084

Vyhodnocení disperze v delším horizontu

Zajímavější problematikou je sledování chování nanočástic v delším časovém horizontu, což lépe vystihuje jejich reálné chování. Do této části experimentu postoupily dva nejlepší vzorky z předchozí části, a to N₂ a N₄, tedy nejlepší vzorek s použitou povrchovou úpravou nanočástic proti vzorku bez surfaktantu. U obou bylo provedeno 5 aditivních měření v tří denních intervalech, což nám dává 20-denní interval, ve kterém je možno sledovat aglomeraci částic.

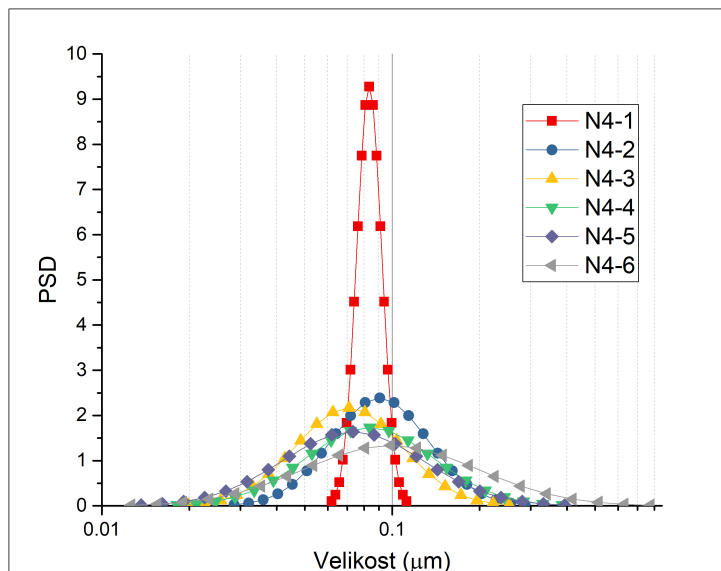
Jako první jsou na Obr.39 prezentovány výsledky vzorku N₂ (s aplikovaným surfaktantem S₂).



Obr. 39: Disperze vzorku N₂ v čase

Výsledky vzorku N₂ vykazují postupnou degradaci v čase, kdy klesá maximální hodnota PSD a rozšiřuje se interval rozložení velikosti částic (tedy přesná koncentrace se zmenšuje jak se rozšiřuje interval). To znamená postupnou aglomeraci a sedimentaci částic.

Podobný trend můžeme sledovat i u vzorku N₄ (bez povrchové úpravy) na Obr.40.



Obr. 40: Disperze vzorku N₄ v čase

U něho je okamžitě vidět rozdíl oproti vzorku N₂ – po prvním měření následuje okamžitě snížení maxima křivky spolu se značným rozšířením intervalu, které značí velikou variaci ve velikosti částic. Dále toto rozdělení moc nemění, nicméně z menších hodnot PSD je vidět větší sedimentace částic.

Výše popsané chování je vidět i na výsledcích v Tab.19.

V čase se výsledky mnoho nemění. Největší koncentrace je vždy zhruba na stejné velikosti, konce intervalů jsou také podobné, ale je třeba brát v potaz jejich větší šíři.

Na konci intervalu měření jsou vidět u obou vzorků podobné centrální hodnoty, které značí podobnou velikost částic. Větší šíři intervalu však má vzorek N₄ bez povrchové úpravy, což spolu s náhlým poklesem PSD značí odklon od jedné, menší velikosti částic k aglomeraci do rozměrnějších klastrů. Přínosem povrchové úpravy je značné zpomalení tohoto procesu.

Tab. 19: Hodnoty disperze v čase

Vzorek	FWHM [μm]	Centroid [μm]	Vzorek	FWHM [μm]	Centroid [μm]
N2-1	0.030	0.102	N4-1	0.019	0.084
N2-2	0.045	0.084	N4-2	0.084	0.107
N2-3	0.043	0.081	N4-3	0.073	0.091
N2-4	0.051	0.095	N4-4	0.099	0.098
N2-5	0.099	0.118	N4-5	0.103	0.099
N-6	0.168	0.116	N4-6	0.181	0.110

Rozmíchávání vzorků

Na sadě vzorků N5 až N8 bylo provedeno pokusné rozmíchání po zhruba třech měsících kdy vzorky volně sedimentovaly. U vzorků N5 a N8 byly po této době viditelné usazené vrstvy, u N6 tyto vrstvy nebyly tak výrazné, a vzorek N7 nevykazoval skoro žádné viditelně usazené vrstvy. Hodnocení zde bylo založeno na subjektivním optickém vyhodnocení.

V prvním zkušebním kroku bylo provedeno protřepání nádoby se vzorkem. Rozmíchání usazenin proběhlo u vzorků N6 a N7 po několika protřepání, u vzorku N5 však byla potřeba delší doba rozmíchání, a u posledního vzorku N8 zůstaly i po intenzivním protřepání usazené vrstvy na dně nádoby.

Druhým krokem bylo rozmíchání pomocí ultrazvuku po dobu 20 minut, což mělo u všech vzorků pozitivní výsledek bez viditelných usazenin.

Exaktní měření disperze zde již nebylo provedeno, jelikož zařízení je lokalizováno na zahraničním pracovišti. I tak byly mezi vzorky viditelné rozdíly, které

indikují lepší rezistenci proti sedimentaci u vzorků s použitou povrchovou úpravou.

ZHODNOCENÍ, PŘÍNOSY A ZÁVĚR

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

9.1 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNĚ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

VÝŠE uvedené výsledky provedených experimentálních měření dokládají směr práce, jejímž cílem je zaměřením se na problematické parametry přírodních esterových olejů, studium jejich vlivu a jejich zlepšení.

Zhodnocení vlivu elektrického namáhání

Cílem experimentu bylo zhodnocení vlivu elektrického namáhání na řepkový a slunečnicový olej, což posloužilo dvěma účelům. Prvním bylo zjištění rychlosti elektrické degradace na jednotlivé rostlinné oleje, druhým pak byl výběr vhodného oleje z výše uvedené dvojice, který by dále sloužil jako výchozí kapalina pro další stádia. Z experimentálně získaných dat byl jako lepší vyhodnocen řepkový olej, který měl prokazatelně menší tendenci k degradaci pod střídavým napětím. Toto podporují i praktické zkušenosti z testu, kdy řepkový olej projevoval zřetelně menší sklon ke gelaci než druhý testovaný olej.

Zhodnocení vlivu antioxidantů

Druhý experiment se zaměřil chemické složení řepkového oleje, a degradační děje v něm probíhající. Konkrétně se jednalo o způsoby zpomalení oxidačních procesů v rostlinném oleji. Oxidační procesy, jak je z teoretických částí patrné, jsou v rostlinných olejích procesy nežádoucími. Jejich působením se rostlinný olej rozkládá, a jeho parametry se zhoršují. Použit byl řepkový olej, který v prvním experimentu vyšel jako lepší z měřené dvojice. Posuzoval se vliv různých antioxidantů na rychlost degradace olejových vzorků.

Pro hodnocení funkčnosti těchto antioxidantů byly použity výsledky ztrátového činitele $tg \delta$ a z něho vypočítaný koeficient relativní rychlosti oxidace. Pomocí těchto jednoduchých ukazatelů byl hodnocen účinek antioxidantu v řepkovém oleji. Mezi nejlépe hodnoceny patřily vzorky s kyselinou citronovou (CA) a mixy propyl gallate (PG) s kyselinou citronovou o různé koncentraci.

Obecně lze říci, že použití antioxidantů pomáhá zpomalovat stárnutí oleje, a tedy zhoršování jeho parametrů. Druhou stranou mince je však správné nastavení množství antioxidantu kvůli limitním hodnotám ztrátového činitele, které tyto oleje mají splnit (v rámci experimentu mělo značné množství vzorků problémy s počáteční limitní hodnotou $tg \delta$).

Zhodnocení vlivu obsahu vody

Další experiment se zabýval zhodnocením interakce vlhkosti a izolačního systému s použitým přírodním esterovým olejem ENVITRAFOL, vyvinutým na autorském pracovišti. Cílem bylo prokázání vyšší tolerance vlhkosti přírodních esterových olejů při provozních podmínkách. To bylo docíleno zrychleným stárnutím na několika úrovních teploty, při současném kombinovaném vlivu dalších

reakčních činitelů, konkrétně vlhkosti, papírové izolace a měděného vodiče. Tato kombinace představuje komplexní působení vlivů jako v případě reálného elektrického stroje.

Díky odlišnému chemickému složení mají přírodní estery přirozeně vyšší toleranci vlhkosti, čímž se zásadně liší od minerálních olejů. To v praxi představuje výhodu, díky menším nárokům na nízký obsah vody, avšak představuje morální problém oproti minerálním olejům, u kterých jakákoliv vlhkost představovala značný nedostatek.

Dosažené výsledky potvrzují schopnost vyvinutého oleje ENVITRAFOL zachovat si elektroizolační vlastnosti nejenom v podmínkách zvýšené vlhkosti, ale i v situaci vzájemného působení několika současně působících reakčních činitelů. To je potvrzeno při konfrontaci výsledků s normou pro čisté, nepoužité kapaliny [25].

Zhodnocení použitelnosti nanočástic

Poslední experiment se zabýval velice aktuální tematikou, a to vlivem nanočástic na parametry elektroizolační kapaliny. Samotný vliv na parametry však nebyl hlavní částí práce, jelikož přínos daných nanočástic závisí na jejich druhu. Důležitější je však jejich dlouhodobé chování. Z tohoto důvodu bylo hlavním záběrem práce zjištění disperze nanočástic v kapalině a zdůraznění důležitosti a funkce povrchové úpravy nanočástic s ohledem na dlouhodobou použitelnost takové kapaliny.

Mezi výsledky jsou pozorovatelné rozdíly mezi vzorky s aplikovanou povrchovou úpravou a vzorkem bez ní. Záleží však na vhodnosti povrchové úpravy pro danou aplikaci – zde byl jasně nejlepší surfaktant pro esterové disperze. Ten byl dále použit pro měření disperze v čase, kdy byly jeho výsledky přímo porovnány

se vzorkem s čistými nanočásticemi. Během 20-denního intervalu bylo zjištěno omezení tempa sedimentace na vzorku s aplikovanou povrchovou úpravou nanočástic.

9.2 DOPORUČENÍ PLYNOUCÍ Z DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Problematika nasazení přírodních esterů jako elektroizolační kapaliny přináší mnohá úskalí, a to jak pro výrobce, kteří musí novou kapalinu vyvinout k naplnění provozních norem a požadavků zákazníka, tak pro zákazníka, potažmo provozovatele, který daný transformátor s tímto olejem dále provozuje a udržuje. Určitá úskalí spojená s vývojem takové kapaliny popisuje tato disertační práce. Problematika však nekončí vývojem kapaliny, je třeba znát dlouhodobé chování a trendový vývoj dielektrických parametrů, které ovlivňují funkčnost. Zde dostávají prostor technické normy.

Technické normy a limitní hodnoty

První normy, vzhledem k neexistenci dlouhodobých statisticky hodnotitelných dat z provozu přírodních esterů, vycházely z požadavků na minerální oleje. Jejich hodnoty jsou však, díky odlišnému chemickému složení, u některých parametrů nedosažitelné. V dnešní době však již existuje několik norem, které míří přímo na přírodní esterové elektroizolační oleje, jako ČSN EN 62770 - *Kapaliny pro elektrotechnické aplikace - Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení* [25]. Ta se však zabývá pouze stavem na začátku, tedy pro čisté, nepoužité oleje. Zajímavé a kritické jsou z této normy hodnoty pro obsah vody, přeskokové napětí, ztrátový činitel a číslo kyselosti. Jejich hodnoty jsou v Tab.20.

Tab. 20: Požadavky na přírodní esterové oleje [25]

Parametr	Norma	Limitní hodnota
obsah vody	IEC 60814	max. 200 mg/kg
přeskokové napětí	IEC 60156	min. 35 kV/2.5mm
ztrátový činitel $\text{tg } \delta$	IEC 60247	max. 0.05
číslo kyselosti	IEC 61125	max. 0.6 mg KOH/g

V oblasti mezinárodních norem reflektuje přírodní estery IEEE standard [20], který pro ně uvádí teplotní třídu 130. Doporučené hodnoty pro přírodní estery však v této normě vychází z hodnot pro minerální oleje, a příliš nereflektují odlišnosti esterových olejů.

Vhodnější limity pro nepoužité oleje doporučuje novější norma IEEE C57.147-2018 [26] pro údržbu přírodních esterů v transformátorech. Obsah vody stanovuje na 450 ppm (pro zařízení na <69 kV), průrazné napětí na 40 kV/2mm. Ztrátovým činitelem se zabývá pouze nepřímo, a to z důvodů nedostatku provozních dat. Udává však i provizorní hodnoty pro provozně zestárlé přírodní estery. Konkrétně ztrátový činitel 0.03 a číslo kyselosti 0.5 mg KOH/g.

Souhrn dosavadních uživatelských zkušeností představuje skupina CIGRE ve zprávě 436 (říjen 2010) [23]. Představuje zkušenosti a odlišnosti přírodních esterů, stejně jako parametry průmyslově vyráběných esterových olejů jako Cargill FR3 a ABB BIOTEMP. Neudává však žádné doporučené hodnoty provozních parametrů.

Poslední normou, která je nyní ve fázi příprav, je IEC 62975 s názvem *Natural esters - Guidelines for maintenance and use in electrical equipment*. Ta se, oproti jiným normám, zabývá i stavem kapalin v provozu. Uvedené rozpětí hodnot je

doporučená úroveň pro zvýšení četnosti kontrol a další konzultaci s výrobcem daného typu kapaliny.

Z výše uvedených norem je dále uveden přehled kriteriálních hodnot pro oleje na bázi přírodních esterů, ke kterým je připojen návrh limitních hodnot dle provedených experimentů. V návaznosti na záběr experimentálních měření této disertační práce je souhrn omezen na čtyři důležité parametry, a to přeskokové napětí, ztrátový činitel, obsah vody a číslo kyselosti, jako nejdůležitější indikátory provozní schopnosti dané izolační kapaliny. Pokud není řečeno jinak, hodnoty jsou aplikovatelné pro transformátory o napěťové hladině do 69 kV.

Tab. 21: Přehled limitních hodnot z dostupných norem

	Přeskokové napětí	Ztrátový činitel	Obsah vody	Číslo kyselosti
ČSN 62770 - nepoužité	min 35 kV/2.5mm	max 0.05 (90°C)	200 ppm	0.6 mg KOH/g
C57.147-2018 - nepoužité	45 kV/2mm	0.04 (100°C)	300 ppm	0.06 mg KOH/g
Cigre 436 - nepoužité	min 35 kV/2.5mm	0.02 (90°C)	saturace 1100 ppm	0.03 mg KOH/g
IEC 62975 - nepoužité	min 55 kV/2.5mm	0.07 (90°C)	200 ppm	0.08 mg KOH/g
C57.147-2018 - v provozu	40 kV/2mm	0.03 (90°C)	450 ppm	0.5 mg KOH/g
IEC 62975 - v provozu	30-40 kV/2.5mm	0.15-0.3 (90°C)	200-400 ppm	0.3-0.5 mg KOH/g
Navrhované limity	35/35 kV/2.5mm	0.05/0.3 (90°C)	300/500 ppm	0.1/1 mg KOH/g

Nově navrhované limitní hodnoty vycházející z provedených experimentů lze, v konfrontaci s výše uvedenými normami, odůvodnit následovně:

- Přeskokové napětí – minimální hodnota 35 kV/2.5mm byla splněna i při výrazně ztížených podmínkách na vzorcích s degradovaným olejem, a není třeba brát v tomto ohledu zřetel na jiný druh kapaliny.

- Ztrátový činitel – vyšší hodnota je přirozená pro přírodní estery, jakákoliv další přísada (byť přínosná) ji může výrazně zvýšit, nicméně renomovaní výrobci dokáží tyto nízké hodnoty dodržet.
- Obsah vody – obecně požadovaná hodnota 200 ppm je, pro přírodní ester mající přirozeně vysokou saturační hodnotu, velice nízká. Z provedených experimentů vyplývá schopnost bezpečně fungovat, a splňovat minimální provozní hodnoty, i při obsahu vody 500 ppm bez výraznějšího poklesu např. průrazného napětí, což podporují i jiná zjištění [23]. Ostatní normy doporučují až příliš nízké hodnoty.
- Číslo kyselosti – má trochu odlišný význam než u minerálního oleje, reprezentuje stav všech rozkladných reakcí v oleji (hydrolýza, oxidace), z nich některé z nich nejsou degradační; limity jsou tedy doporučené vyšší. Tento limit je vhodný kombinovat s obsahem vody pro jejich synergií.

Zásady provozování přírodních esterů

Při zvažování nasazení elektroizolační kapaliny na bázi přírodních esterů je potřeba brát ohled na jejich rozdílné vlastnosti plynoucí z odlišného chemického složení. V provozní funkčnosti se od minerálních olejů v mnohém neodlišují, avšak parametrově se mohou odlišovat i diametrálně. Tyto rozdíly však nejsou na překážkou, či omezením pro praktické nasazení.

V případě nasazení takového druhu kapaliny je v první řadě potřeba určitá změna pohledu na kritériální parametry. Přidanou problematikou je zde oxidace, a její dopady na dlouhodobou funkčnost.

Z konstrukčního hlediska je dobré zamyslet se nad odlišnými fyzikálními vlastnostmi, jako viskozita, a jejími vlivy na např. přenos teplota. Pracovní bod je díky

tomu posunout výše, což umožňuje lepší možnosti krátkodobého přetížení pro vykrytí odběrových špiček, jakož i provoz na vyšší výkonnové hladině. [88]

Nespornou výhodou je při použití esterových olejů ochránění papírové části izolace, která prokazatelně méně degraduje. Testy například výrobce oleje FR3 Cargill prokázaly prodloužení životnosti pevné části izolace 5x až 8x oproti použití minerálního oleje [89].

V případě použití nanočástic nelze než doporučit řádné zvážení celé otázky, jasného nadefinování cílových přínosů, a poté komplexní řešení problematiky počínající testem kompatibility částic, aplikace vhodné povrchové úpravy a konstrukčních úprav, jejichž cílem by bylo zamezit hromadění a ulpívání nanočástic na konstrukci transformátoru. Vhodné by také bylo použití chlazení typu OFAN nebo OFAF pro zlepšení cirkulace oleje, a udržení nanočástic v oběhu co nejvíce.

PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

PŘEDLOŽENÁ disertační práce se zabývá problematikou nasazení transformátorových olejů na bázi přírodních esterů, konkrétně jejím vývojem, hodnocením odlišností provozních parametrů, a její konfrontaci s novými trendy v oblasti elektrotechniky. Práce je založena na několika experimentech, z nichž každý se zabývá specifickou oblastí, ve které se přírodní esterové oleje odlišují od olejů minerálních. Tyto rozdíly jsou popsány na základě např. chemického složení a jejich efekt vysvětlen. V dalším kroku je popsáno provedení experimentu s cílem vylepšení této vlastnosti, či doložení funkčnosti takovéto kapaliny s odlišnými parametry. V závěru jsou tyto parametry konfrontovány s platnými, či připravovanými, technickými normami, ke kterým je přiložen autorův návrh na případnou úpravu těchto limitních hodnot.

Originální je v několika případech provedení experimentu, či použití diagnostické metody. Zejména se jedná o experimentální ověření funkčnosti vyvinutého esterového oleje na přírodní bázi v situaci zvýšeného obsahu vody spolu se současným působením dalších faktorů, kdy byla použita náročnější metodika, než je vyžadována.

Dále pak celý přístup ke zhodnocení použitelnosti nanočástic ve spojení s transformátorovým olejem, se zaměřením na zjištění reálné distribuce nanočástic, který je unikátní, zejména ve spojení s přírodním esterem.

Zásadní je také výsledná konfrontace dosažených výsledků s technickými normami, jejichž limitní hodnoty nejsou pro daný typ kapaliny nastavené zcela vhodně, zejména pro "použitou" kapalinu, kdy se vlastně jedná o parametry provozní diagnostiky.

Přínosy, které lze považovat za původní:

- Vymezení vhodné kapaliny na bázi přírodních esterů pro použití v transformátorech, a studium jejího chemického složení
- Specifikace vhodných antioxidantů pro přírodní esterový olej na základě testu oxidační stability s ohledem na provozní parametry
- Sestavení experimentálního uspořádání pro ověření funkčních vlastností přírodních esterů při simulovaných zvýšených/navýšených/extrémních provozních podmínkách
- Vliv a interakce nanočástic s přírodním esterovým olejem se zaměřením na dlouhodobou použitelnost
- Experimentální určení efektu povrchové úpravy aplikované na nanočástice
- Rozbor dlouhodobého rozložení nanočástic v přírodním esterovém oleji
- Konfrontace dosažených výsledků s technickými normami a vytvoření návrhu limitních hodnot
- Vytvoření doporučení k provozování elektroizolačních kapalin na bázi přírodních esterů

ZÁVĚR

Hlavní záběr předložené disertační práce spočívá v oblasti elektroizolačních kapalin, které v posledních letech prochází značným vývojem. Největší pozornost se přesouvá z olejů minerálních na alternativní kapaliny na bázi přírodních esterů. Jejich nespornou výhodou je biodegradabilita, čímž vyhoví požadavku na ochranu životního prostředí. Vyhovují i ve většině elektroizolačních parametrů, avšak u některých s určitými ústupky. Zcela samostatnou otázkou je problematika dlouhodobé použitelnosti kvůli odlišnému chemickému složení, díky kterému se odlišují i v působení dalších provozních faktorů.

Z výše uvedených důvodů se experimentální část systematicky zaměřuje na problematické parametry přírodních esterů, kterými jsou značně ovlivňovány degradačními vlivy, a to ztrátový činitel, přeskokové napětí, obsah vody a číslo kyselosti. Ty mají v kategorii elektroizolačních kapalin největší výpovědní a srovnávací hodnotu. Též se v těchto parametrech minerální a esterové oleje nejvíce odlišují.

Na základě prvního experimentu byl vybrán jako zástupce přírodních esterů řepkový olej, se kterým se dále pracovalo na autorském pracovišti jako s vhodnou kapalinou pro použití v transformátoru. Další experimenty pracovaly s tímto olejem a řešily jeho dlouhodobé vlastnosti, konkrétně zpomalení oxidačních procesů prostřednictvím testu oxidační stability, a dále vliv vody a dalších materiálů

na funkční vlastnosti. Oba experimenty mají vypovídající hodnotu o vývoji a chování řepkového oleje při zvýšeném působení degradačních faktorů.

Poslední popsany experiment se zabýval novým trendovým způsobem vylepšení dielektrických parametrů přidáním nanočástic. Aplikace nanočástic však přináší mnoho nových problémů, a to hlavně z hlediska dlouhodobé použitelnosti. Z tohoto důvodu bylo hlavním cílem poukázat na důležitost povrchové úpravy nanočástic a následné měření disperze částic v přírodním esterovém oleji v určitém časovém horizontu.

V poslední části jsou dosažené výsledky konfrontovány s dostupnými technickými normami, jejichž limity jsou diskutovány a kde jsou také navrženy úpravy. Ty jsou důležité, neboť zkušeností z dlouhodobého provozu není pro tyto nové kapaliny dostatečné množství, a limitní hodnoty tedy stále procházejí určitým vývojem.

Možným směrem dalšího výzkumu jsou dlouhodobé testy s kombinovaným působením degradačních faktorů. Jak již bylo nastíněno v této práci, mínusem použití přírodních esterových olejů je právě nedostatek dlouhodobých provozních dat, které by posloužily pro nastavení servisních intervalů, a potažmo pro limitní diagnostické hodnoty v technických normách.

Druhou oblastí je komplexní výzkum zaměřený na použití nanočástic s důrazem na jejich dlouhodobé použití. I z této práce je však jasné, že tato problematika má mnohá úskalí.

LITERATURA

- [1] H. R. Sheppard. A century of progress in electrical insulation 1886-1986. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1986.
- [2] datasheet k oleji shell s3 - stránky fmv.se [online]. https://www.fmv.se/FTP/M7789-000183/datablad/M0746-067000_Shell_Diala_S3_ZX-I_Dried.pdf. [cit. 1.8.2017].
- [3] datasheet k oleji nynas nytro taurus - stránky výrobce nynas.com [online]. <https://www.nynas.com/en/product-areas/transformer-oils/oils/nytro-taurus/>. [cit. 10.1.2019].
- [4] D. Sundin. The service history of ester-based fluids used in railway transformers. In *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 31–34, June 1990.
- [5] Midel - stránky výrobce oleje [online]. <http://www.midel.com/productsmidel/midel-en>. [cit. 29.7.2017].
- [6] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, and J. T. Mullen. Biodegradable electrical insulation fluids. *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference*, pages 465–468, 1997.
- [7] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, and E. J. Walsh. Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid. *1998 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference (Cat. No.98CH36246)*, pages 3/1–3/4, 1998.

- [8] C. P. McShane. New dielectric coolant concepts for distribution and power transformers. In *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.99CH36338)*, pages 55–62, June 1999.
- [9] I. Fofana. 50 years in the development of insulating liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29(5):13–25, 2013.
- [10] C. McShane. New safety dielectric coolants for distribution and power transformers. *IEEE Industry Applications Magazine*, 6(3):24–32, May 2000.
- [11] C. P. McShane, G. A. Gauger, and J. Luksich. Fire resistant natural ester dielectric fluid and novel insulation system for its use. In *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333)*, volume 2, pages 890–894 vol.2, April 1999.
- [12] M. Rebolini and F. Scatiggio. Update to preliminary study for use of vegetable esters in big power transformers. In *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, pages 1–4, June 2017.
- [13] J. Viertel, K. Ohlsson, and S. Singha. Studies of the improvement of the viscosity of natural ester liquids. In *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, pages 1–4, June 2014.
- [14] Y. Bertrand and P. Lauzevis. Development of a low viscosity insulating liquid based on natural esters for distribution transformers. In *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, pages 1–4, June 2013.
- [15] P. Rozga and M. Stanek. Comparison of lightning breakdown voltage of natural ester liquids of different viscosities. In *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pages 1–4, Sep. 2016.

- [16] K. J. Rapp, G. A. Gauger, and J. Luksich. Behavior of ester dielectric fluids near the pour point. In *1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.99CH36319)*, volume 2, pages 459–462 vol.2, Oct 1999.
- [17] S. P. Moore, W. Wangard, K. J. Rapp, D. L. Woods, and R. M. D. Vecchio. Cold start of a 240-mva generator step-up transformer filled with natural ester fluid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(1):256–263, Feb 2015.
- [18] A. Sbravati, K. Rapp, P. Schmitt, and C. Krause. Transformer insulation structure for dielectric liquids with higher permittivity. In *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, pages 1–4, June 2017.
- [19] C. Krause, U. Kaminskis, A. Wild, K. Rapp, and A. Sbravati. Dielectric prototype test of a full-scale 420 kv power transformer hv lead exit insulated with natural ester liquid. In *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pages 129–133, June 2016.
- [20] Ieee standard for the design, testing, and application of liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers using high-temperature insulation systems and operating at elevated temperatures. *IEEE Std C57.154-2012*, pages 1–49, Oct 2012.
- [21] K. J. Rapp, A. Sbravati, J. Vandermaar, and M. Rave. Evaluation of transformer components for high temperature transformers. In *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pages 385–389, June 2018.
- [22] V. Vasconcellos, A. Sbravati, L. Cera Zanetta, K. Rapp, L. Lombini, S. Nazzari, F. Scatiggio, and A. Valant. Increased loadability of transformers using natural ester and cellulosic materials as high temperature insulation systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 34(5):8–17, Sep. 2018.

- [23] Cigre brochure 436 - experience in service with new insulating liquids. <http://a2.cigre.org/Publications/Technical-Brochures>.
- [24] K. J. Rapp, C. P. McShane, and J. Luksich. Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and kraft paper. In *IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005.*, pages 393–396, June 2005.
- [25] Čsn en 62770 - kapaliny pro elektrotechnické aplikace - nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení. ÚNMZ Praha, 04/2014.
- [26] Ieee guide for acceptance and maintenance of natural ester insulating liquid in transformers. *IEEE Std C57.147-2018 (Revision of IEEE Std C57.147-2008)*, pages 1–47, July 2018.
- [27] D. Hanson, K. Li, J. Plascencia, C. Beauchemin, C. Claiborne, D. Cherry, G. Frimpong, J. Luksich, A. Lemm, and R. Martin. Understanding dissolved gas analysis of ester liquids: An updated review of gas generated in ester liquid by stray gassing, thermal decomposition and electrical discharge. In *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pages 138–144, 2016.
- [28] M. Duval. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(6):22–29, November 2008.
- [29] R. Pillai, S. Bowers, K. Rapp, and C. Chitnis. Dga of natural ester filled transformers: Experience with retrofilled and new transformers. In *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, pages 1–3, June 2017.

- [30] Výrobce olejů midel. <https://www.midel.com/midel-in-use>. [cit. 26.3.2019].
- [31] Výrobce olejů envirotemp. <https://www.envirotempfluids.com/>. [cit. 26.3.2019].
- [32] R. Pillai, F. Havaldar, and C. Chitnis. Natural esters for life and capacity enhancement of distribution transformers. *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1):355–358, 2017.
- [33] A. Hamdi, I. Fofana, and M. Djillali. Stability of mineral oil and ester mixtures under thermal ageing and electrical discharges. *IET Generation, Transmission Distribution*, 11(9):2384–2392, 2017.
- [34] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, and E. Gockenbach. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers.1. investigation of mixed liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 18(3):18–31, 2002.
- [35] M.S. Brewer. Natural antioxidants: Sources, compounds, mechanisms of action, and potential applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(4):221–247, 2011.
- [36] *Biodegradable Oils and their Impact on Paper Ageing*. 2017.
- [37] R. Liu, L. A. A. Pettersson, T. Auletta, and O. Hjortstam. Fundamental research on the application of nano dielectrics to transformers. In *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 423–427, Oct 2011.
- [38] A. Raymon, S. Sakthibalan, C. Cinthal, R. Subramaniraja, and M. Yuvaraj. Enhancement and comparison of nano-ester insulating fluids. *IEEE*

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(2):892–900, April 2016.
- [39] Irwanto, C. G. Azcarraga, Suwarno, A. Cavallini, and F. Negri. Ferrofluid effect in mineral oil: Pdiv, streamer, and breakdown voltage. In *2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, pages 1–4, Sept 2014.
- [40] Třífázový autotransformátor 350 mva etd. <http://www.etd-bez.cz/cz/produkty>. [cit. 29.8.2017].
- [41] Vikas Vishal, Saurabh and Prashant. Transformer’s history and its insulating oil. *Proceedings of the 5th National Conference INDIACom-2011*, 2011.
- [42] Oenergetice.cz [online]. <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>. [cit. 3.8.2017].
- [43] Čsn en 60076 - výkonové transformátory - Část 1 obecně. ÚNMZ Praha, 05/2012.
- [44] Jan Doncuk. *Monitoring výkonových transformátorů přenosové soustavy*. PhD thesis, Západočeská Univerzita v Plzni, 2014.
- [45] Václav Mentlík. *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN, Praha, 2008.
- [46] Čsn en 60076 - výkonové transformátory - Část 3 izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti. ÚNMZ Praha, 05/2014.
- [47] Návod pro výkonový transformátor abb. http://vfservis.cz/files/000279_Navod_pro_vykonovy_transformator.pdf. [cit. 29.7.2017].

Literatura

- [48] Provozní návod 3-fázové distribuční hermetizované transformátory elin plněné minerálním olejem. <http://www.trafocz.cz/pdf/navod-elin.pdf>. [cit. 13.9.2017].
- [49] Diagnostika stavu transformátorů pomocí měřícího vozu. http://www.megger.sk/wp-content/uploads/2015/04/Transformer-Test-VAN_article_CZ.pdf. [cit. 14.8.2017].
- [50] Cigre wg a2.37 - transformer reliability survey. <http://a2.cigre.org/Publications/Technical-Brochures>.
- [51] J. Artbauer a J. Šedivič a V. Adamec. *Izolanty a izolácie*. ALFA, Bratislava, 1969.
- [52] Martin Heathcote. *J & P Transformer Book*. Elsevier Ltd., 2007.
- [53] Václav Mentlík. *Dielektrické prvky a systémy*. BEN, Praha, 2006.
- [54] Michal Svoboda. *Implementace Condition Based Managementu elektroizolačních systémů*. PhD thesis, Západočeská Univerzita v Plzni, 2017.
- [55] Čsn en 60641-2 ed.2 (346564) lesklá lepenka a obyčejná lepenka pro elektrotechnické účely - Část 2: Metody zkoušek. ÚNMZ Praha, 06/2005.
- [56] T. O. Rouse. Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 14(3):6–16, 1998.
- [57] Martin Širůček. *Zlepšování parametrů výkonných transformátorů*. PhD thesis, Západočeská Univerzita v Plzni, 2013.
- [58] E. Yuliasuti. Analysis of dielectric properties comparison between mineral oil and synthetic ester oil. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:868501da-8cae-473c-9753-b2f72de56eff>.

- [59] R. Polanský P. Trnka. Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír. *Electroscope*, 2007.
- [60] Čsn en 60422 ed.2 - minerální izolační oleje v elektrických zařízeních. ÚNMZ Praha, 09/2013.
- [61] M. Eklund. Mineral insulating oils; functional requirements, specifications and production. In *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 68–72, 2006.
- [62] Dhorali Gnanasekaran and Venkata Prasad Chavidi. *Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids*. Springer Nature, 2018.
- [63] Eva PROCHÁZKOVÁ. Vliv rafinace na kvalitativní parametry a stabilitu rostlinných olejů lisovaných za studena [online]. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Zlín, 2006 [cit. 2017-09-28].
- [64] I. L. Hosier, A. Guushaa, E. W. Westenbrink, C. Rogers, A. S. Vaughan, and S. G. Swingler. Aging of biodegradable oils and assessment of their suitability for high voltage applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(3):728–738, 2011.
- [65] M. Amanullah, S. M. Islam, S. Chami, and G. Ienco. Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid. In *IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005.*, pages 397–400, June 2005.
- [66] M. Svoboda and P. Trnka. Alternative electrical insulating fluids in power transformers. In *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pages 399–402, May 2014.

Literatura

- [67] Čsn en 61125 - nové izolační kapaliny na bázi uhlovodíků. zkušební metody na vyhodnocování oxidační stálosti. ÚNMZ Praha, 01/1996.
- [68] Sigma aldrich, dodavatel chemických sloučenin a potřeb. <http://www.sigmaaldrich.com/czech-republic.html>.
- [69] I. Fofana, H. Borsi, and E. Gockenbach. Fundamental investigations on some transformer liquids under various outdoor conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(6):1040–1047, Dec 2001.
- [70] Daniel Martin. *Evaluation of the Dielectric Capability of Ester Based Oils for Power Transformers*. PhD thesis, 06 2007.
- [71] R. Pillai, F. Havaldar, and C. Chitnis. Natural esters for life and capacity enhancement of distribution transformers. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1):355–358, 2017.
- [72] K. J. Rapp, C. P. McShane, and J. Luksich. Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and kraft paper. In *IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005.*, pages 393–396, June 2005.
- [73] O. Koreh, K. Torkos, M. Bashir Mahara, J. Boressay, and V. Izvekov. Study of water clusters in insulating oils by fourier transform infrared spectroscopy. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(6):896–902, Dec 1998.
- [74] Z. Mu, Y. Yang, and Z. D. Wang. Effect of moisture on frequency domain spectroscopy (fds) for oil-impregnated-paper insulation. In *2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*, pages 1–4, July 2018.
- [75] Čsn en 60156 - izolační kapaliny - stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - zkušební metoda. ÚNMZ Praha, 08/1998.

- [76] Čsn en 60247 - izolační kapaliny - měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ($\tan \delta$) a rezistivity při stejnosměrném napětí. ÚNMZ Praha, 02/2005.
- [77] J. G. Hwang, F. O'Sullivan, M. Zahn, O. Hjortstam, L. A. A. Pettersson, and R. Liu. Modeling of streamer propagation in transformer oil-based nanofluids. In *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 361–366, Oct 2008.
- [78] Y. Du, Y. Lv, F. Wang, X. Li, and C. Li. Effect of tio₂ nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil. In *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 1–3, June 2010.
- [79] F. O'Sullivan, J. G. Hwang, M. Zahn, O. Hjortstam, L. Pettersson, R. Liu, and P. Biller. A model for the initiation and propagation of positive streamers in transformer oil. In *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pages 210–214, June 2008.
- [80] Víctor Primo, Daniel Pérez-Rosa, Belén García, and J Cabanelas. Evaluation of the stability of dielectric nanofluids for use in transformers under real operating conditions. *Nanomaterials*, 9:143, 01 2019.
- [81] Yuzhen lv, Yang Ge, Lei Wang, Zhen Sun, You Zhou, Meng Huang, Chengrong Li, Jinsha Yuan, and Bo Qi. Effects of nanoparticle materials on prebreakdown and breakdown properties of transformer oil. *Applied Sciences*, 8:601, 04 2018.
- [82] Zhong Shao-Long, Dang Zhi-Min, Zhou Wen-Ying, and Cai Hui-Wu. Past and future on nanodielectrics. *IET Nanodielectrics*, 1:41–47(6), April 2018.
- [83] T. Tanaka and T. Imai. Advances in nanodielectric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29(1):10–23, January 2013.

- [84] V. P. Charalampakos, A. Bakandritsos, G. D. Peppas, E. C. Pyrgioti, and I. F. Gonos. A comparative study of natural ester based nanofluids with Fe_2O_3 and SiO_2 nanoparticles. In *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, pages 1–4, June 2017.
- [85] Azadeh Ghadimi, Saidur Rahman, and Hendrik Metselaar. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54:4051–4068, 08 2011.
- [86] J. Li, Z. Zhang, P. Zou, S. Grzybowski, and M. Zahn. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 28(5):43–50, Sep. 2012.
- [87] Georgios D. Peppas, Aristides Bakandritsos, Vasilis P. Charalampakos, Eleftheria C. Pyrgioti, Jiri Tucek, Radek Zboril, and Ioannis F. Gonos. Ultrastable natural ester-based nanofluids for high voltage insulation applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(38):25202–25209, 2016.
- [88] V. Vasconcellos, A. Sbravati, L. C. Zanetta, and J. Luksich. Validation of long term performance of natural ester and kraft paper as high temperature insulation system. In *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, pages 364–367, June 2017.
- [89] Envirotemp fr3 brochure. <https://www.cargill.com/doc/1432076501275/envirotemp-fr3-brochure.pdf>. [cit. 6.6.2019].

PUBLIKACE AUTORA

- [1] V. Mentlík, P. Trnka, M. Svoboda, J. Hornak, P. Totzauer and L. Harvánek, *Aging phenomena of paper-oil insulating system under different voltage stress*. In: 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). IEEE, 2015, 2015, s. 548-551. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295330. ISBN 978-1-4799-8903-4
- [2] P. Totzauer, *Napětové namáhání EIS s biodegradabilními oleji*. In Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 111-114. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [3] P. Totzauer, J. Hornak, P. Trnka, L. Harvánek, V. Mentlík and J. Ulrych, *Diagnostics of composite insulation materials for simple online diagnostics tools*. In: 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). IEEE, 2016, 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800685. ISBN 978-1-5090-0496-6
- [4] P. Trnka, J. Soucek, J. Hornak and P. Totzauer, *EIS aging estimation and threshold values*. In: 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). IEEE, 2016, 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800684. ISBN 978-1-5090-0496-6
- [5] P. Totzauer, J. Hornak and P. Trnka, *The benefits of using online diagnostic tools for portable diagnostic device: With focus on accelerated age-*

- ing and partial discharge*. In: 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016, 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521750. ISBN 978-1-5090-0908-4
- [6] P. Trnka, A. Čejková, V. Mentlík, P. Totzauer, L. Harvánek and T. Tomášková, *Effect of inhibitors on thermal degradation of vegetable oils*. In: 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016, 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521752. ISBN 978-1-5090-0908-4
- [7] J. Hornak, L. Harvanek, P. Totzauer and P. Trnka, *Influence of thermal aging on electrical properties of inhomogeneous dielectric material*. In: 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2016, 2016, s. 1-4. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521751. ISBN 978-1-5090-0908-4
- [8] P. Trnka, V. Mentlik, J. Hornak, A. Čejková and P. Totzauer, *Natural esters as insulating fluids – Some other features*. In: 2016 ELEKTRO. IEEE, 2016, 2016, s. 641-644. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512158. ISBN 978-1-4673-8698-2
- [9] P. Totzauer, J. Hornak and P. Trnka, *Ageing of used composite insulation systems under different voltage stress*. In: 2016 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika). IEEE, 2016, 2016, s. 1-3. DOI: 10.1109/DIAGNOSTIKA.2016.7736488. ISBN 978-1-5090-6178-5
- [10] P. Totzauer, *Ageing of composite insulation under different voltage stress*. In Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 75-78. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [11] J. Ulrych, P. Totzauer and V. Mentlík, *Dielectric properties of modified natural ester – Perspective electrical insulating liquid*. In: 2017 18th International

- Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2017, 2017, s. 1-4. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967315. ISBN 978-1-5090-6406-9
- [12] P. Totzauer, P. Trnka, J. Hornak, P. Kadlec and J. Pihera, *Antioxidant variations in the nature ester oil*. In: 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2017, 2017, s. 1-6. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967314. ISBN 978-1-5090-6406-9
- [13] J. Hornak, P. Kadlec, P. Totzauer, P. Trnka and M. Gutten, *Dielectric spectroscopy and absorption/resorption analysis of composite dielectric with MgO filler*. In: 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-4 [cit. 2018-01-08]. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967250. ISBN 978-1-5090-6406-9
- [14] J. Hornak, P. Trnka, P. Totzauer and M. Gutten, *The effect of space charge accumulation in high voltage insulation systems*. In: 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). IEEE, 2017, 2017, s. 1-5. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967251. ISBN 978-1-5090-6406-9
- [15] P. Totzauer, P. Trnka, V. Mentlík, J. Hornak, P. Kadlec, J. Ulrych and J. Pihera, *A study of various inhibitor mixtures in natural ester oil*. In: 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). IEEE, 2017, 2017, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124721. ISBN 978-1-5090-4877-9
- [16] J. Ulrych, P. Totzauer and V. Mentlík, *Modified natural ester – prospective electrical insulating liquid*. In: 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). IEEE, 2017, 2017, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124720. ISBN 978-1-5090-4877-9

- [17] P. Totzauer, *Vliv antioxidantů na rostlinné oleje*. In Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 75-78. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [18] J. Řeboun, J. Hlína, P. Totzauer and A. Hamáček, *Effect of copper- and silver-based films on alumina substrate electrical properties*. *Ceramics International*. 2018, 44(3), 3497-3500. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.107. ISSN 02728842. **IF: 2.986**
- [19] V. Mentlík, P. Trnka, J. Hornak and P. Totzauer, *Development of a Biodegradable Electro-Insulating Liquid and Its Subsequent Modification by Nanoparticles*. *Energies*. 2018, 11(3), 508. DOI: 10.3390/en11030508. ISSN 1996-1073. **IF: 2.262**
- [20] O. Michal, V. Mentlík, P. Trnka, J. Hornak, P. Totzauer, *Dielectric properties of biodegradable vegetable oil based nanofluid*. In Proceedings of the 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Piscataway: IEEE, 2018. s. 363-366. ISBN: 978-1-5386-4612-0 , ISSN: 2376-5623
- [21] P. Trnka, P. Totzauer, V. Mentlík, J. Hornak, O. Michal, J. Leffler, *Aging of electrical insulating system based on organic ester*. In 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD) : /proceedings/. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-6389-9
- [22] J. Hornak, O. Michal, P. Trnka, P. Kadlec, V. Mentlík, P. Totzauer. *Verification of relative permittivity models for composite nanodielectrics at elevated temperatures*. In 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018): /proceedings/. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-5086-8 , ISSN: 2381-5043

- [23] P. Trnka, V. Mentlík, P. Totzauer, J. Hornak, J. Pihera. *Natural ester oils - additional features*. In Conference proceedings : 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017). Tucumán: National University of Tucumán, 2017. s. 1-5. ISBN: 978-987-45745-6-5
- [24] J. Hornak, P. Trnka, V. Mentlík, O. Michal, P. Totzauer. *Different approaches for mathematical evaluation of resorption currents in nanodielectrics*. In 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018) : /proceedings/. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-5086-8 , ISSN: 2381-5043
- [25] P. Totzauer, J. Kúdelčík, J. Hornak, O. Michal, P. Trnka, V. Mentlík. *Analysis of particle size distribution and other parameters of nanoparticles in natural ester oil*. In 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). IEEE, 2019.
- [26] Š. Hardoň, J. Kúdelčík, P. Trnka, P. Totzauer, J. Hornak, O. Michal. *The influence of ZnO nanoparticles on the dielectric properties of epoxy resin*. In 25th International Conference Applied Physics of Condensed Matter (APCOM 2019) : /Proceedings/,
- [27] P. Totzauer, P. Trnka. *Different ways to improve natural ester oils*. In TRANSCOM 2019, the 13th international scientific conference of young European scientists, Ph.D. students and their tutors.
- [28] Š. Hardoň, J. Kúdelčík, J. Hornak, O. Michal, P. Totzauer, P. Trnka. *The influence of ZnO nanoparticles in the epoxy resin on the complex permittivity and dissipation factor*. In TRANSCOM 2019, the 13th international scientific conference of young European scientists, Ph.D. students and their tutors.

- [29] P. Kadlec, J. Pihera, P. Prosr, T. Džugan, J. Hornak, P. Totzauer, T. Kroupa, H. Zemčík, P. Sedláčková, R. Pavlica, J. Komárek. *Evaluation of Structure Influence within the Context of Water Diffusion and Surface Current of Glass Reinforced Polymer Composites for High Voltage Insulation*. In Conference proceedings : 21th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2019).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Saturace vlhkosti různých typů oleje, převzato [23] . . .	7
Obrázek 2	Vliv vlhkosti na průrazné napětí, převzato [23]	8
Obrázek 3	Třífázový autotransformátor 350 MVA, převzato [40] . .	17
Obrázek 4	Uspořádání magnetických obvodů	18
Obrázek 5	Zdroje a lokace závad [50]	24
Obrázek 6	Chemický vzorec celulózy	26
Obrázek 7	Zjednodušené schéma výroby minerálního oleje	29
Obrázek 8	Uhlovodíkové vazby v minerálních olejích (zleva parafinická, naftenická, aromatická [58]	30
Obrázek 9	Triglyceridy s třemi mastnými kyselinami	32
Obrázek 10	Elektrodový systém pro měření rychlosti degradace . . .	41
Obrázek 11	Lepenka po měření s viditelnou degradací a průrazy . . .	43
Obrázek 12	Křivka odolnosti vůči střídavému napětí	44
Obrázek 13	Křivka odolnosti vůči stejnosměrnému napětí	45
Obrázek 14	Znázornění oxidace mastných kyselin	48
Obrázek 15	Strukturní vzorce použitých antioxidantů, zleva BTHQ, BTHX a PG [68]	52
Obrázek 16	Výsledky přeskokového napětí	54
Obrázek 17	Teplotní závislost permitivity před TOS	55
Obrázek 18	Teplotní závislost permitivity po TOS	56
Obrázek 19	Ztrátový činitel před TOS, první skupina	57
Obrázek 20	Ztrátový činitel po TOS, první skupina	57

Seznam obrázků

Obrázek 21	Ztrátový činitel před TOS, druhá skupina	58
Obrázek 22	Ztrátový činitel po TOS, druhá skupina	59
Obrázek 23	Ztrátový činitel před TOS, třetí skupina	60
Obrázek 24	Ztrátový činitel po TOS, třetí skupina	60
Obrázek 25	3D graf teplotně-frekvenční závislosti reálné části permitivity - před a po TOS	62
Obrázek 26	3D graf teplotně-frekvenční závislosti ztrátového činitele - před a po TOS	63
Obrázek 27	Vazba vody na esterový řetězec	65
Obrázek 28	Vliv vlhkosti na průrazné napětí, převzato [23]	67
Obrázek 29	Rovnováha vody mezi přírodním esterovým olejem a papírem, převzato [36]	68
Obrázek 30	Hodnoty průrazného napětí při různém stupni vlhkosti a tepelné expozice	74
Obrázek 31	Závislost průrazného napětí na obsahu vody	74
Obrázek 32	Výsledky ztrátového činitele při 90°C	75
Obrázek 33	Výsledky rezistivity při 90°C	76
Obrázek 34	Teplotní závislost ztrátového činitele	83
Obrázek 35	Frekvenční závislosti ztrátového činitele při 25 a 40°C	83
Obrázek 36	Frekvenční závislost ztrátového činitele při 60 a 80°C.	84
Obrázek 37	Teplotní a frekvenční závislost permitivity	85
Obrázek 38	Disperze vzorků po namíchání	86
Obrázek 39	Disperze vzorku N ₂ v čase	87
Obrázek 40	Disperze vzorku N ₄ v čase	88

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Tabulkové hodnoty oleje Shell Diala S3 ZX-1 a Nynas Nytro Taurus [2]	3
Tabulka 2	Seznam diagnostických zkoušek [45]	21
Tabulka 3	Zastoupení vybraných mastných kyselin v rostlinných olejích [23]	34
Tabulka 4	Požadavky na přírodní esterové oleje [25]	36
Tabulka 5	Vlastnosti použitých olejů	42
Tabulka 6	Složení mastných kyselin v řepkovém oleji	52
Tabulka 7	Označení vzorků s antioxidanty	53
Tabulka 8	Výsledky ztrátového činitele, část 1	58
Tabulka 9	Výsledky ztrátového činitele, část 2	59
Tabulka 10	Výsledky ztrátového činitele, část 3	61
Tabulka 11	Označení vzorků pro BDS	62
Tabulka 12	Hodnoty saturace vody v různých olejích [23]	65
Tabulka 13	Průměrný hmotnostní rozdíl ve vzorku papírové lepenky	70
Tabulka 14	Označení vzorků v experimentu a doba tepelné expozice	71
Tabulka 15	Označení vzorků v experimentu a doba tepelné expozice	72
Tabulka 16	Vlastnosti řepkového oleje	81
Tabulka 17	Přehled označení experimentálních vzorků	81
Tabulka 18	Hodnoty disperze po rozmíchání	86
Tabulka 19	Hodnoty disperze v čase	89
Tabulka 20	Požadavky na přírodní esterové oleje [25]	96

Seznam tabulek

Tabulka 21	Přehled limitních hodnot z dostupných norem	97
------------	---	----