

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zlepšování vlastností elektroizolačních struktur

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Bc. Anna ČEJKOVÁ**
Osobní číslo: **E13N0005P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Zlepšování vlastností elektroizolačních struktur**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Definujte jednotlivé typy používaných elektroizolačních systémů používaných ve vn technice
2. Pro vybrané skupiny EIS detailně popište jejich použití v elektrotechnice
3. Pro konkrétní vn EIS stanovte meze použitelnosti
4. Navrhněte EIS olej-papír s biologicky odbouratelnou izolační kapalinou
5. Proveďte potřebná měření pro ověření vlastností nového EIS

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

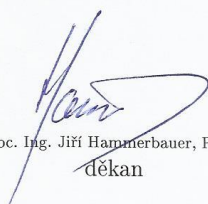
1. Mentlík, V., Polanský, R., Pihera, J., Prosr, P., Trnka, P.: Diagnostika elektrických zařízení, ISBN 978-80-7300-232-9, BEN technická literatura Praha 2008.
2. Elektronické informační zdroje.
3. Materiály KET
4. Mentlík V., Trnka P. a kol., Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN 2011.

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

Katedra technologií a měření


Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na zlepšování alternativních elektroizolačních struktur. Text je rozdělen do pěti částí; první se zabývá elektroizolačními systémy vysokonapěťových strojů, druhá se zaměřuje na elektroizolační systém netočivých strojů. Třetí část je zaměřena na diskuzi mezi použitelností systému olej – papír s alternativními oleji. Následuje návrh elektroizolačního systému s biologicky odbouratelnou kapalinou. V poslední části jsou uvedeny výsledky experimentů a naměřených hodnot zkoumaných olejů.

Klíčová slova

Elektroizolační systém, transformátor, systém olej – papír, minerální olej, syntetický olej, rostlinný olej, inhibitor, ztrátový činitel, průrazné napětí, kritérium

Abstract

The master's thesis is concerning to the problem of improving of alternative electrical insulating systems namely the fluids. The thesis is divided into five chapters. The first deals with electrical insulation systems of high voltage devices and in the second part offers closer look at the electrical insulating system of non-rotating machines. The third part is the discussing the limits for oil - paper insulation system of alternative oils in comparison to currently used fluids. In following part an electrical insulation systems with biodegradable fluid is proposed based on tested fluids. The last chapter is the conclusion and it gives the results of experiments and measured values of examined oils.

Key words

Electrical insulating system, transformer, system oil - paper, mineral oil, synthetic oil, vegetable oil, inhibitor, dissipation factor, breakdown voltage, criterion

Prohlášení

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

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

.....
Čejková
podpis

V Plzni dne 27.4.2015

Anna Čejková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za odborné vedení, za cenné rady a připomínky během zpracování práce bych chtěla také poděkovat Ing. Jakubovi Součkovi a Ing. Magdaléně Trnkové, Ph.D. ETD Transformátory, a.s. a nakonec své rodině za podporu během mých studií.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉMY VE VN TECHNICE	11
1.1 TEPLOTNÍ TŘÍDY	11
1.1.1 <i>Materiály teplotních tříd.....</i>	<i>12</i>
1.2 TECHNOLOGIE RESIN-RICH	14
1.3 VPI (VACUUM PRESSURE IMPREGNATION)	14
1.4 POROVNÁNÍ RESIN-RICH A VPI.....	15
2 ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉMY NETOČIVÝCH STROJŮ	16
2.1 EIS TRANSFORMÁTORŮ	16
2.1.1 <i>Izolační systém magnetického obvodu.....</i>	<i>16</i>
2.1.2 <i>Izolační systém svorníků.....</i>	<i>17</i>
2.1.3 <i>Izolační systém vinutí</i>	<i>18</i>
2.1.4 <i>Plynná chladicí média transformátorů.....</i>	<i>19</i>
2.1.5 <i>Kapalná chladicí a izolační média transformátorů.....</i>	<i>20</i>
2.1.6 <i>Diagnostika parametrů transformátorů.....</i>	<i>22</i>
3 MEZE POUŽITELNOSTI SYSTÉMU OLEJ - PAPÍR.....	23
3.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	23
3.1.1 <i>Přeskokové napětí</i>	<i>23</i>
3.1.2 <i>Ztrátový činitel.....</i>	<i>24</i>
3.1.3 <i>Vnitřní rezistivita.....</i>	<i>26</i>
3.2 NEELEKTRICKÉ PARAMETRY	27
3.2.1 <i>Číslo kyselosti</i>	<i>27</i>
3.2.2 <i>Obsah vody.....</i>	<i>28</i>
3.2.3 <i>Oxidační stabilita.....</i>	<i>28</i>
3.2.4 <i>Biologická odbouratelnost.....</i>	<i>29</i>
3.2.5 <i>Bod tekutosti</i>	<i>30</i>
4 ALTERNATIVNÍ ELEKTROIZOLAČNÍ KAPALINY.....	38
4.1 NÁVRH EIS S BIOLOGICKY ODBOURATELNOU KAPALINOU	38
5 MĚŘENÍ PARAMETRŮ ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN	40
6 ZÁVĚR.....	46
SEZNAM LITERATURY.....	48
PŘÍLOHA 1 RAFINACE ROPY	54
PŘÍLOHA 2 TEPLoty Z METEOROLOGICKÝCH STANIC.....	56
PŘÍLOHA 3 NAMĚŘENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE	58
PŘÍLOHA 4 NAMĚŘENÉ HODNOTY ELEKTRICKÉ PEVNOSTI.....	64
PŘÍLOHA 5 OXIDAČNÍ STABILITA	69

Seznam symbolů a zkratk

SF ₆	fluorid sírový
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
EIS	elektroizolační systém
EP	elektrická pevnost [V/m]
RTE	relativní index teplotní odolnosti
ERU	Energetický regulační úřad
CAIDI	Customer Avarage Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
DBDS	dibensyldisulfid
MgO	oxid hořečnatý
Mg ₂ SiO ₄	křemičitan dihořečnatý
CO ₂	oxid uhličitý
U	elektrické napětí [V]
s	směrodatná odchylka [V]
v	variační koeficient [%]
U _p	průrazné napětí [kV/2,5mm]
ε	permitivita [Fm ⁻¹]
C	kapacita [F]
R	elektrický odpor [Ω]
tg δ	ztrátový činitel
C	tepelná kapacita [J/C]
Q	teplo [W]
α	součinitel přestupu tepla [Wm ⁻² K ⁻²]
P	výkon [W]
KOH	hydroxid draselný
mg KOH/g	miligramy hydroxidu draselného potřebné k neutralizaci volných mastných kyselin obsažených v 1 g oleje.

Úvod

Elektroizolační systém je důležitou součástí elektrických strojů. Nejčastěji se v elektrotechnické praxi vyskytují dvě možná rozdělení elektroizolačních systémů podle typu strojů, nebo dle skupenství. Elektroizolační systém, dále jen EIS, je důležitou částí elektrických zařízení, která odděluje místa s různým elektrickým potenciálem.

System olej – papír je nejčastěji používaným EIS u vysokonapěťových transformátorů a tlumivek. Pevnou izolací je v tomto systému papír, převážně lepenka, a izolační kapalinou je olej, který zde plní jak funkci chladicí, tak funkci izolační. Hojně používanou elektroizolační kapalinou je minerální olej, který je získáván frakční destilací ropy. Tento olej na ropné bázi má řadu výhod a nevýhod. Značnou nevýhodou v používání minerálních olejů je nesnadná biologická odbouratelnost a toxicita. Dalším důvodem hledání alternativních elektroizolačních kapalin je nedostatek a vyčerpatelnost světových zásob ropy. Mezi alternativní kapaliny dnes patří oleje na bázi přírodních či syntetických esterů. Tyto kapaliny jsou snadno biologicky odbouratelné, nejedovaté a splňují požadavky, které současná společnost klade na ochranu lidského života a životního prostředí. Používání těchto olejů je vhodné v uzavřených a nebezpečných prostorách, protože mají vysokou požární bezpečnost a vysoký bod vzplanutí.

Přírodní a syntetické oleje dnes ještě plně nenahradily minerální oleje používané v distribučních transformátorech s výkonem 25 kVA až 5 MVA, protože nedosahují některých vlastností [11, 25, 26, 50], které jsou pro izolační systém velmi důležité (například ztrátový činitel a elektrická pevnost). Vývoj a testování těchto alternativních olejů probíhá ve výzkumných zařízeních [26, 47], která se zároveň snaží vylepšit vlastnosti olejů na bázi esterů přidáváním různých inhibitorů. Rostlinné oleje mají nízký bod tekutosti (průměrně – 20 °C) [34]. Výrobci mají proto obavu, že by při výpadku transformátoru v zimním období, mohlo dojít ke ztuhnutí rostlinného oleje. Byla proto provedena úvaha, zda by k tomuto jevu mohlo dojít. Další překážkou je cena těchto alternativních kapalin, která je často vyšší, než je tomu u olejů na ropné bázi.

1 Elektroizolační systémy ve VN technice

Trend ve vývoji elektrických strojů je zmenšování rozměrů, a zároveň navyšování výkonů. Návrh elektroizolačního systému zařízení je značně složitý a je ovlivněn mnoha faktory, které budou v této práci dále popsány. Návrh EIS je ovlivněn nejen konstrukčními faktory, ale v současnosti je také kladen důraz na životní prostředí a bezpečnost. Jako příklad lze uvést používání rostlinných olejů v transformátorech, kde nahrazují minerální oleje. Oleje na ropné bázi jsou produktem z neobnovitelných zdrojů, jsou nesnadno biologicky odbouratelné a zatěžují životní prostředí.

Většina elektroizolačních systémů je organického charakteru, proto je limitujícím parametrem jejich teplotní třída. Přehled teplotních tříd je uveden v následující kapitole.

1.1 Teplotní třídy

Každý EIS je charakterizován svou teplotní třídou. Teplotní třída daného zařízení se odvozuje od provozní teploty, která u elektrických zařízení způsobuje stárnutí izolace. Systém teplotních tříd se neustále vyvíjí a je zdokonalována stupnice. Klasifikací teplotních tříd se zabývá norma ČSN EN 60085 ed. 2 (330250).

Teplotní třída je číselné označení, které je rovné maximální teplotě ve stupních Celsia, pro niž je vhodný EIS. Dále se definuje relativní index teplotní odolnosti (RTE) viz norma ČSN EN 60216-6 ed. 2, ČSN EN 60216 – 8 [5, 36]. RTE je teplota ve stupních Celsia, během níž má použitý materiál za předpokládanou dobu svého života uspokojivé vlastnosti v porovnání se standardním materiálem. Jak již bylo zmíněno, každý elektroizolační systém se skládá z více materiálů, které mají různé teplotní třídy. Výsledná teplotní třída zařízení je výslednicí a průnikem jednotlivých tříd použitých materiálů [1,4].

Tabulka 1 Teplotní třídy izolanů [4]

Relativní index teplotní odolnosti	Teplotní třída	Předchozí písemné označení
< 90	70	
> 90 - 105	90	Y
> 105 - 120	105	A
> 120 - 130	120	E
> 130 - 155	130	B
> 155 - 180	155	F

> 180 - 200	180	H
> 200 - 220	200	N
> 220 - 250	220	R
> 250	250	

1.1.1 Materiály teplotních tříd

V předešlých odstavcích byly zmíněny teplotní třídy, v následujícím textu jsou jednotlivým teplotním třídám přiřazeny charakteristické materiály.

- **Teplotní třída 70** – organické materiály jako papír, dřevo, bavlna, hedvábí (bez dalších úprav a impregnace). Jejich výhodou je, že jsou levnější a šetrnější k životnímu prostředí. Tyto materiály se však používají jen zřídka.
- **Teplotní třída 90 (Y)** – představiteli této skupiny jsou organické materiály: papír, dřevo, bavlna, hedvábí s běžnými impregnanty. Za běžné impregnanty jsou považovány šelak, asphalt, bitumeny a oleje. Dalším zástupcem je tvrzené bukové dřevo a polyvinylchlorid. Tato teplotní třída se vyskytuje u **EIS olej – papír**.
- **Teplotní třída 105 (A)** - organické materiály: papír, dřevo, bavlna, hedvábí, tkaniny přírodní či syntetické, syntetické látky na bázi celulózy. Vždy jsou s vhodným impregnantem (šelak, olejové, celulózové a asphaltové laky). Lepenky se také řadí do této teplotní třídy. Jedná se o lepenky lesklé, drážkové, transformátorové. Mezi další zástupce patří hedvábné syntetické tkaniny lakované olejem - pryskyřičným lakem, lepicí pásky na bázi papíru, PET fólie, kaučuk, tvrzená tkanina s fenolickou pryskyřicí a další. S touto teplotní třídou se lze setkat také u **EIS olej – tepelně upravený papír** v transformátorech.
- **Teplotní třída 120 (E)** – zástupcem této skupiny jsou organické materiály: celulózový papír, tvrzený papír či tkanina, buničina v kombinaci s impregnanty (fenolformaldehydová či fenolická pryskyřice).
- **Teplotní třída 130 (B)** – anorganické materiály: skleněná vlákna, azbest, sulfátový papír s pojivy na bázi epoxidů a fenolických pryskyřic, lepicí pásky na bázi PET/kaučuk a další.
- **Teplotní třída 155 (F)** – skleněná vlákna, slídový papír, PET, PEN fólie,

aramidový papír, epoxidové a novolakové pryskyřice, kompozitní materiály. Kompozity jsou na bázi skleněné tkaniny s epoxidovým pojivem, nebo pojiva na bázi modifikovaných polyesterů, na bázi skleněné tkaniny, PET, PEN fólie, rekonstruované slídy a pojiva, drážkové izolace na bázi aramidového papíru Nomex.

- **Teplotní třída 180 (H)** – silikonová pryskyřice, epoxidové pryskyřice, aramidy, polyamidy, polyestery, slída, slídový papír, kompozity.
- **Teplotní třída 200 (N)** – sklo, azbest, aramidové papíry, impregnační laky na bázi polyesteralkydů.
- **Teplotní třída 220 (R)** – sklo ve formě vláken, azbest, aramidové papíry, silikonová pojiva.
- **Teplotní třída 250** – polyimidy Kapton, aramidy Nomex, PTFE polytetrafluoretylen, slída se silikonovým pojivem.
- **Mimo teplotní třídu** – jsou to vysokoteplotní materiály na bázi keramiky (silikátové nebo bezsilikátové, oxidové, bezoxidové), dále Kapton (výrobce uvádí teplotu 450 °C). Pro teploty 500 °C se používá fólie složená ze skla a hliníku [1,4].

Pro názornost byly uvedeny teplotní třídy materiálů, které se používají v elektroizolačních systémech. Rozdělení EIS je na následujících řádcích.

Rozdělení VN EIS

1) Elektroizolační systém netočivých strojů

Z širokého spektra možných elektrotechnických zařízení se tato práce zejména zabývá EIS vysokonapěťových transformátů. Transformátory se dělí dle provedení izolačního systému na suché, zalévané a na ty, u nichž je použit kapalný izolant s tuhým izolantem. U suchých transformátorů se jako chladivo používá vzduch nebo fluorid, není zde tedy využita žádná kapalina. Izolačním systémem je zde papír, lepenka, Nomex či kombinované materiály. Zalévané transformátory jsou charakterizovány tím, že mají cívky zalité pryskyřicí, nebo jsou použity metody VPI nebo resin-rich. U posledního typu transformátorů se používá jako izolační prvek lepenka, papír, Nomex a kompozity [1]. Právě elektroizolační systém olej-papír byl vybrán jako zástupce vysokonapěťového systému, kterým se zabývá tato práce, tzn. aspekty použitelnosti a návrhem jeho vývoje směrem k vyšší biodegradabilitě. Tato problematika je

blíže popsána v následujících kapitolách.

2) Elektroizolační systém točivých strojů

Točivé stroje jsou děleny z hlediska pracovního napětí na nízkonapěťové a vysokonapěťové. U nízkonapěťových strojů je izolační systém složen z izolace vodičů, vyložení drážek a impregnantu. Lak, bavlna a skleněná vlákna tvoří izolaci vodičů. Drážková lepenka či Nomex jsou využity u vyložení drážky. Izolace u vysokonapěťových točivých strojů se dělá dvojím způsobem. První technologie je resin-rich a druhá je VPI (Vacuum Pressure Impregnation). Oba systémy mají určité výhody a nevýhody. Rozhodnutí, kterou z těchto dvou metod použít, je na výrobcí [1].

1.2 Technologie Resin-rich

Technologie Resin-rich využívá tříložkový kompozit s výchozím izolačním před impregnovaným materiálem, který obsahuje 30 % až 40 % pojiva v B stavu. Skleněná tkanina vytváří nosnou část, izolací je kalcinovaný slídový papír, který je částečně předtvrzen [1]. Na tento materiál se nanáší kontinuální či diskontinuální vrstva a následuje vytvrzení ve formách, které umožňují stlačení izolace na požadovaný rozměr. Jedná se o tzv. fázi gelace pryskyřice, které ještě předchází odplynění. K odplynění dochází před dosažením gelační fáze, kde je možné otevřít formy pro odchod plynných látek. Poté probíhá vytvrzování při teplotě 160 – 170 °C po dobu hodin (záleží na použitém druhu pryskyřice). Důležitým prvkem je ochlazování, které musí být pozvolné, aby nedocházelo k vadám [1].

1.3 VPI (Vacuum Pressure Impregnation)

Vakuově tlaková impregnace VPI je proces, během něhož jsou plně navinuté statory nebo rotory ponořeny do pryskyřice. Prostřednictvím kombinace suchého a mokrého vakua a tlakových cyklů je pryskyřice nanášena v celém izolačním systému. Nejčastěji je použit systém VPI u trakčních motorů. Savá páska (VPI páska v B stavu), která tvoří základ, má tři komponenty. Nosnou částí je buď skleněná tkanina, polyamidová fólie, či polyesterové rouno. Pojivo musí být kompatibilní s použitým impregnantem, aby mohlo dojít k proimpregnování všech vrstev. Proto se používá nekalcinová slída, která má hrubší zrnění, což je vlastnost důležitá pro pevnost v tahu materiálu při ovíjení. Vhodným impregnantem je epoxidová, polyesterová či silikonová pryskyřice. Jak uvádí literatura [1], impregnační zařízení je složeno z tlakové a vakuotěsné kotle, který je vybaven ohřívacím a chladicím zařízením a zásobníkem impregnantu. Před samotnou impregnací je ohříván ochlazený impregnant na danou teplotu. Proces probíhá za intenzivního míchání a dochází k odplynění ve vakuu. Impregnační proces probíhá při teplotě vyšší než 100 °C po 20 hodin. Po dokončení impregnačního procesu je

zbytek impregnantu ochlazen a vrácen do zásobníku. Následuje vytvrzení v nevýbušném prostředí [1]. Výhodou této technologie je vyšší dielektrická pevnost, zvýšená mechanická pevnost, lepší ochrana proti vniknutí vody [24]. Nevýhodou je neopravitelnost vinutí.

1.4 Porovnání resin-rich a VPI

Pro použití technologie VPI je nutné drahé a náročné technické zařízení. Vytvrzování u VPI je rizikové, kvůli vtékání pryskyřice do četných záhybů. VPI je homogenní technologie, je u ní také možnost dosažení vyšších napětí, naopak u resin-rich dochází k výskytu nehomogenit. Oprava u resin-rich je možná pro každou cívku, u VPI se musí vinutí úplně nahradit. Systém VPI umožňuje zkrácení cívek při zachování výkonu stroje a tím i úsporu materiálu kolem 6 % [1]. Ochrana před vnější korónou je u technologie VPI bandáží, u technologie resin-rich je ochrana zabezpečena polovodivým lakem nebo páskou. Z tohoto srovnání jsou patrné výhody a nevýhody jednotlivých technologií. Proto se musí pro každý případ správně zvolit vhodná technologie [1, 3].

Tato práce se blíže věnuje elektroizolačnímu systému netočivých strojů, který je detailněji popsán v kapitole 2.

2 Elektroizolační systémy netočivých strojů

Elektroizolační systémy netočivých strojů jsou konstruovány dle použití, napětí a specifických požadavků zákazníků. Jedním z netočivých strojů je transformátor. Vysokonapěťové transformátory využívají izolační systém olej – papír, který se již používá přes sto let. Jeho nespornými výhodami jsou „dimenzovatelnost“ na „jakékoliv“ provozní napětí (MV) i výkon (10^3 MVA). Elektroizolační systém je v dalších odstavcích popsán z hlediska stavby transformátoru.

2.1 EIS transformátorů

Jak již bylo řečeno, nejpoužívanějším EIS je u výkonových, přístrojových a distribučních transformátorů systém olej – papír. Tento systém je používán proto, že ho lze libovolně dimenzovat na určitou napěťovou a výkonovou hladinu. Je tvořen dvěma složkami – pevnou složkou a kapalnou složkou. Pevná složka je většinou zastoupena materiálem na bázi celulózy, kapalná složka je tvořena elektroizolačním (minerálním) olejem, který má i vhodné chladicí vlastnosti. Zmíněný systém tvoří izolaci vinutí. V transformátoru se dále využívá řada izolačních materiálů v jednotlivých částech stroje.

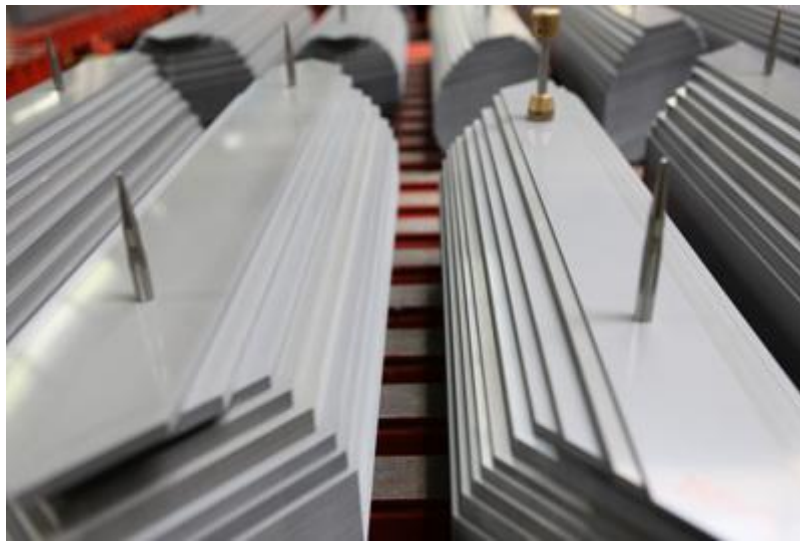
2.1.1 Izolační systém magnetického obvodu

Magnetický obvod se skládá z orientovaných plechů (z důvodů vířivých proudů), plechy se musí proto od sebe izolovat. K tomuto odizolování se používá epoxidová pryskyřice ve formě laku.

Epoxidové pryskyřice se zařazují do třídy reaktivních prepolymerů a polymerů. U epoxidových pryskyřic probíhá několik reakcí, např. katalytická homopolymerace, nebo reakce s druhotnými reakčními složkami s polyfunkčními aminy, fenoly, alkoholy a thiole. Reakční složky se nazývají tvrdidla. Chemická reakce polyepoxidů s polyfunkčními tvrdidly vytvoří termosetický polymer, který má výborné mechanické vlastnosti i chemickou odolnost. Epoxidové pryskyřice se používají v průmyslových aplikacích, ale i v domácnostech. Epoxidové pryskyřice se vyznačují velkou odolností vůči vlhku, prachu, teplu a dobrou adhezí. Nejčastěji jsou používány na výrobu kompozitních materiálů v kombinaci se syntetickými a skleněnými vlákny a slídou [6].

V současnosti převládá trend používání anorganické fosfátové vrstvičky na povrchu plechů. Jak uvádí literatura [35], Carlite je finální úprava, která se skládá ze dvou vrstev. Základní vrstvou je C_2 (skelný film), který vzniká chemickou reakcí na povrchu během vysokoteplotního žhání s MgO. Vzniká Mg_2SiO_4 . Následuje očištění a další žhání při (800 -

850 °C), během něhož se nanáší finální fosfátová vrstva C₅.



Obrázek 1 Magnetický obvod - plechy převzato z [35]

2.1.2 Izolační systém svorníků

Svorníky se používají k fixaci jádra transformátoru a jsou z nemagnetické oceli. K izolaci svorníků a šroubů, které stahují a prochází magnetickým obvodem, se používá transformátorová lepenka.

Transformátorová lepenka je vyráběná z čistých celulózových vláken, je speciálním druhem trvanlivé slisované papíroviny. Transformátorové lepenky jsou děleny na tři základní druhy: kalandrovaná, formovaná a tvrzená. Lepenka je charakterizována ohebností, hladkostí, elasticitou, hnědou barvou a je šetrná k životnímu prostředí. Norma ČSN EN 60641-3-1 stanovuje technické požadavky, jako například dielektrickou pevnost. Mezi další kladné vlastnosti patří vysoká odolnost vůči průraznému napětí a mastným nečistotám. Pro ještě lepší vlastnosti se tyto lepenky impregnují olejem. Elektrotechnické lepenky jsou využity jako izolační materiál elektrických vodičů v motorech, transformátorech, ale i jiných elektrických zařízeních. Lepí se dle potřeby, například stlačovací kruh má cca 10 cm tloušťky. Výroba elektrotechnické lepenky probíhá tak, že se vyrobí archy lepenky, které se poté řežou na vhodné pásy. Dále se tyto pásy ohýbají a vkládají do drážek elektrických zařízení. Transformátorová lepenka má v dodaném stavu od výrobce [7] tyto parametry: tloušťka 0,05 mm – 6,0 mm, slepovaná lepenka má tloušťku 7,0 mm – 30 mm [7, 8]. Barva transformátorové lepenky je přírodní.



Obrázek 2 Transformátorová lepenka převzato z [7]

2.1.3 Izolační systém vinutí

Vinutí transformátoru se vyrábí z měděných vodičů kruhového nebo obdélníkového průřezu. Vodiče jsou při výrobě již nalakované elektroizolačním lakem. Jednotlivé závity cívky jsou vyrobeny z jednoho či více vodičů, které se střídají v jednotlivých polohách. Střídání vodičů se provádí kvůli délce vodičů, aby byla stejná. V místě střídání vodičů se vodič mechanicky ohýbá. Tím je způsobeno porušení laku, proto se v tomto místě vodič obtáčí izolačními páskami. Často se používají i vodiče, které nejsou lakované, ale jsou ovinuty papírem. Papír, stejně jako lak, na přechodech praská, proto je nutné tyto přechody bandážovat. Mezi jednotlivé závity se vkládají „Spacery“ z transformátorové lepenky. Vytváří se tak kanály pro proudění chladícího média.



Obrázek 3 Cívky transformátoru převzato z [38]

Jako podpůrný materiál izolačního systému vinutí se používá **tvrzené dřevo**. Je vyrobeno skládáním dýhovaných vrstev orientovaných v různých směrech. Nejčastěji se jedná o přírodní bukové dřevo, které je pod tlakem vytvrzeno a je spojeno syntetickými pryskyřicemi. Vyrábí se v mnoha provedeních, které mají rozdílné vlastnosti, aby vyhověly specifickým požadavkům konstruktérů pro dané aplikace. Charakteristickými vlastnostmi jsou nízká hmotnost, vysoká absorpce oleje, dobré elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči změnám teplot, odolnost proti opotřebení a otěru [9].

Celulóza je tedy základním prvkem pevných složek elektroizolačních systémů. Jedná se o chemickou látku tvořící stěnu rostlinných buněk. Celulóza je polysacharid složený z glukózy, nerozvětvené řetězce o 500 jednotkách D-glukózy vytvářejí strukturu této látky. Celulózu je možné získat z bavlny, lnu, bavlníku či ze dřeva ve formě buničiny [10]. Strukturu

celulózy tvoří tři hydroxylové skupiny OH, které jsou spojeny vodíkovými vazbami. Výroba celulózy je chemický proces, při němž se odstraňují nežádoucí složky. Dále vznikají dřevěné štěpky, které se následně rozředí ve vodě, poté následuje mletí v rafiněru, kde se již vlákna doopravují na stanovenou délku. Během těchto procesů se i nadále odstraňují nežádoucí látky, jako je voda. Voda se odstraňuje přesíváním a sušením na papírenských strojích. Mezi často používanými transformátorovými papíry jsou např. krepový papír, Clupak papír, tepelně upravený papír, který má větší tepelnou odolnost. Transformátorový papír se nejčastěji používá pro ovin vodičů vinutí. Tento papír musí mít potřebnou ohebnost a tloušťku 0,075 mm – 0,8 mm. Ovin vodičů vinutí se provádí ve více vrstvách, aby byly zajištěny potřebné mechanické a elektrické vlastnosti [10,11,12].

Další zástupcem, který se používá jako izolace závitů, vrstev či přívodů je **Nomex**. Jedná se o syntetický materiál, který se vyrábí z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu. Standardní papírenské technologie jsou využity během procesu zpracování aramidových částek do podoby papíru. Tento produkt je poté ještě zpevňován kalandrováním při vysokých teplotách. Kalandrování je válcování mezi dvěma válci s vysoce lesklým povrchem. Nomex je velmi odolný vůči vysokým teplotám do 220 °C. Mezi kladné vlastnosti patří elektrické vlastnosti (např. $E_p=40$ kV/mm), je nehořlavý, samozhášivý, odolný vůči chemickým reakcím a záření, při vysokých teplotách netaje, dá se použít se všemi elektroizolačními systémy na bázi laků, pryskyřic, minerálními a syntetickými oleji.

2.1.4 Plynná chladicí média transformátorů

Jak již bylo zmíněno, u suchých transformátorů se používá jako hlavní chladivo vzduch či fluorid sírový.

Vzduch je směs několika plynů – dusíku, kyslíku, argonu, oxidu uhličitého, neonu, kryptonu, hélia a xenonu. Vzduch má malé dielektrické ztráty, malou elektrickou vodivost a průrazná pevnost závisí na hustotě vzduchu. Vzduch se používá jako plynné chladicí médium u transformátorů malých výkonů (desítky až stovky Watt). U transformátoru větších výkonů se nepoužívá, protože je ve vzduchu obsažena vlhkost, která negativně působí na elektroizolační systém olej – papír. Další nevýhodou vzduchu je oxidace kyslíku.

Lepší vlastnosti než vzduch má **fluorid sírový (SF₆)**, který používá ve svých transformátorech firma Mitsubishi [23]. Fluorid sírový je stabilní, nehořlavý, bezbarvý, netoxický a elektronegativní plyn. Kvůli svým izolačním vlastnostem se používá jako izolant. Fluorid sírový se v ovzduší nevyskytuje, vyrábí se uměle. Vzniká z reakce síry a fluoru, dále

pak s fluoridem siřičnatým (SF₄) a dekafluoridem disírovým (S₂F₁₀) viz (1). Následně se odstraňují jedovaté produkty této reakce [2, 14]. Pro čistý plyn jsou dielektrické ztráty prakticky neměřitelné. Mezi kladné vlastnosti patří jeho teplotní stálost a snášenlivost s ostatními technickými materiály. V uzavřených prostorech je nebezpečný, vytlačuje kyslík. Jeho převoz je možný jen v tlakových lahvích, které jsou označeny [13].



V současnosti se již hledá za SF₆ náhrada.

U transformátorů velkých výkonů (kVA, MVA) se používají kapalná chladicí média.

2.1.5 Kapalná chladicí a izolační média transformátorů

Kapalnými izolanty se označují přírodní či syntetické kapaliny, které mohou sloužit i jako chladicí médium v transformátorech a jsou součástí EIS olej - papír. U transformátorů se používá několik druhů olejů.

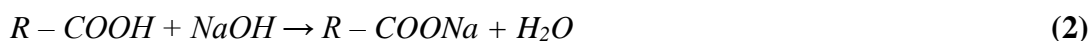
Nejvíce používaným je **minerální olej**. Jedná se o olej vyrobený frakční destilací ropy a je složen ze směsí uhlovodíkových molekul. Během frakční destilace se oddělují jednotlivé složky, těmito složkami jsou benzín, nafta, mazací oleje, těžké ropné oleje, asphalt, plasty. Následuje rafinace, kde se odstraňují nežádoucí příměsi, např. parafíny, síra, dusík, aromatické uhlovodíky a další. Postup rafinace je uveden v příloze 1. Kvalitu ropy, tedy i minerálního oleje určuje geografické naleziště ropy, které udává i její složení.

Minerální oleje se dělí na tři základní skupiny – parafenické, naftenické a aromatické. První dvě skupiny se používají v transformátorech. Minerální oleje mají nízký bod vzplanutí, jsou pomalu rozložitelné a jsou hrozbou pro lidské zdraví a životní prostředí [1, 11]. Nevýhodou minerálních olejů je i přítomnost korozivní síry. Zkušební metoda pro stanovení potenciálně korozivní síry v použitém či nepoužitém izolačním oleji je popsána v normě ČSN EN 62535. Zkušební metody se dělí na kvantitativní a kvalitativní. DBDS (dibensyldisulfid) má za následek tvorbu sulfidů mědi na povrchu měděných vodičů za normálních provozních podmínek transformátorů [57]. Další informace o minerálních olejích lze získat z [39, 40].

Další skupinou kapalných izolantů jsou **syntetické oleje**. Z jejich názvu vyplývá, že se vyrábějí syntézou. Syntetické oleje se nejčastěji vyrábí polymerací nenasycených uhlovodíků. Tyto oleje mají výborné dielektrické vlastnosti, jsou rychleji biologicky rozložitelné než minerální oleje, neohrožují lidské zdraví ani životní prostředí. Midel 7131 se řadí k nejznámějším a nejpoužívanějším syntetickým olejům [27,42, 43]. Do skupiny syntetických

olejů patří také silikonové kapaliny, které jsou nehořlavé, teplotně stálé a jsou šetrné k životnímu prostředí. Použití silikonových kapalin je hlavně v transformátorech, které se nachází v oblasti se zvýšeným nebezpečím požáru a distribučních transformátorech [1, 11]. Z důvodů vysoké ceny se jimi dále tato práce zabývat nebude [19, 20].

Rostlinné oleje jsou dalším zástupcem kapalných izolantů. Tento druh kapalných izolantů se vyrábí ze semen olejnatých rostlin, které jsou složeny ze směsi esterů, glycerinů a nenasycených i nasycených mastných kyselin. Rostlinné oleje se vyrábějí tak, že se musí semena vylisovat, dále se musí usušit a následuje čištění od nečistot. Čištění semen od nečistot je prováděno na sítích a aspirátorech. Semena se poté musí odslupkovat a drtit. Pro lepší elektrotechnické vlastnosti se musí odstranit kyselá složky. Tento proces se provádí třemi druhy – neutralizací (viz rovnice 2), destilací a esterifikací [11, 55].



Destilace je proces, kdy se nádoba s olejem ohřívá, nežádoucí složky odcházejí v plynném skupenství do tepelného výměníku, kde dochází ke zkapalnění. Tento proces je použitelný pro oleje s vysokým číslem kyselosti. Reakce mezi olejem, alkoholem a akcelerátorem je esterifikace. Při ní vzniká voda a glycerol, který se musí ovšem odfiltrat [11].

Mezi rostlinné oleje patří řepkový olej, palmový olej, sójový olej, slunečnicový olej, konopný, ricinový olej a další. Každý z těchto zástupců rostlinných olejů má jiné vlastnosti, které jsou ovlivněny druhem mastných kyselin. Mezi mastné kyseliny patří palmitové, olejové, linolové, stearové a linolenové kyseliny.

Tabulka 2 Složení rostlinných olejů [11]

Název kyseliny	Řepkový olej	Palmový olej	Sójový olej	Slunečnicový olej
Palmitová	4,3 %	45 %	10 %	4,8 %
Stearová	1,6 %	5 %	4 %	3,6 %
Olejová	63,5 %	38 %	23 %	28,6 %
Linolová	17,5 %	10 %	51 %	50,5 %
Linolenová	6,9 %	-	8 %	0,1 %

Dělení rostlinných olejů je na vysychavé (konopný a ořechový), nevysychavé (olivový, ricinový olej), slabě vysychavé (řepkový olej) a polovysychavé (slunečnicový olej). Rostlinné

oleje se používají především v distribučních a menších výkonových transformátorech. Mezi kladné vlastnosti rostlinných olejů patří snadná biologická odbouratelnost a jedná se o obnovitelný zdroj. Rostlinné oleje mají nejhorší ztrátový činitel [1, 11, 15].

Řepkový olej je dnes často používán i jako bionafta. Základem bionafty je tzv. MEŘO. MEŘO je zkratka pro metylestery řepkového oleje, které se získávají rafinačním procesem. Rafinačním procesem je esterifikace, během níž se mísí vylisovaný olej z řepkových semen s metanolem a dalšími katalyzátory. Při esterifikaci vzniká glycerin, který se dále používá v chemickém průmyslu. V zahraničí je použit olej ze sójových bobů k výrobě MEŘO [44]. Při spalování MEŘO dochází k významnému snížení emisí nespálených uhlovodíků a aromatických uhlovodíků, nevznikají oxidy síry a nevytváří se tak kyselá dešť. Šetrnost k životnímu prostředí se vyznačuje i tím, že dochází k asimilaci nově vysazených rostlin k návratu CO₂ do přírodního koloběhu, vysoký obsah kyslíku v MEŘO má vliv i na snižování smogu ve městech [37].

Kapalné izolanty na bázi přírodních esterů se vyrábějí modifikací rostlinných olejů. Přírodní estery se vyrábějí esterifikací nebo neutralizací kyselých složek hydroxidem sodným. Mezi nejznámější oleje patří Envirotemp FR3 od společnosti Cagrell. Estery jsou látky nerozpustné ve vodě, některé mají aromatickou vůni [11, 16].

Návrh nového typu EIS pro transformátory je dále uveden v kapitole 4.

2.1.6 Diagnostika parametrů transformátorů

Na transformátorech se diagnostika dělí na výrobní a provozní. Výrobní diagnostika se provádí při výrobě zařízení a obsahuje různé zkoušky, jako vstupní kontrolu použitých materiálů, zkoušky mezioperační, zkoušky typové, kusové a zvláštní. Provozní zkoušky se provádějí během provozu zařízení a vyhodnocují provozuschopnost daného transformátoru. Rozlišujeme dva druhy provozních zkoušek a to on-line a off-line diagnostiku transformátorů.

Pro transformátor je důležitý stav izolace vinutí, proto se provádí měření činného odporu vinutí, měření izolačního odporu, dále se provádějí zkoušky oteplovací. Oteplovací zkoušky se provádějí na vyrobených transformátorech. Během oteplovací zkoušky se měří teplota chladiva, určuje se teplota vinutí, teplota horní vrstvy oleje, střední teplota oleje, teplota konstrukčních prvků, magnetického obvodu a oleje v jeho blízkosti. Mezi další zkoušky patří měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ a kapacity vinutí, napěťové zkoušky vinutí, zkouška elektrické pevnosti, měření hladin částečných výbojů a případně další [17].

3 Meze použitelnosti systému olej - papír

Pro použití tohoto elektroizolačního systému v transformátorech je nutné, aby byly dodrženy stanovené hodnoty parametrů, jako je například elektrická pevnost, ztrátový činitel a další. Tyto parametry jsou uvedeny v příslušných normách (mezinárodních, státních), dále je možné, že si výrobní podniky a provozovatelé stanoví ve svých podnikových normách vlastní limitní hodnoty parametrů. Pro možné nahrazení minerálních olejů alternativními elektroizolačními kapalinami, jako jsou oleje na bázi organických či syntetických esterů, je třeba, aby nové oleje dosahovaly limitních mezí, které jsou udávány v normách pro minerální oleje. Pro některé parametry alternativních olejů je potřeba stanovit vlastní normy, protože mají jiné fyzikální a chemické vlastnosti. Jednou z norem, která se zabývá syntetickými organickými estery, je norma ČSN EN 61203. Zatímco pro minerální oleje jsou přesně stanoveny meze použitelnosti uvedené v normách [52, 53, 54], pro organické estery nejsou ještě meze dostatečně definovány. Jednou z prací, která se návrhem zabývá, je např. [11].

3.1 Elektrické parametry

Elektrické parametry jsou důležitým a charakteristickým ukazatelem stavu EIS. Vybranými elektrickými parametry v této práci je přeskokové napětí, ztrátový činitel a vnitřní rezistivita.

3.1.1 Přeskokové napětí

Přeskokové napětí se měří dle normy ČSN EN 60156. Elektrodový systém je na obrázku 4. Semisférické elektrody jsou vyrobené z austenické oceli a jsou od sebe vzdáleny 2,5 mm. Do nádoby se vlévá cca 600 ml kapaliny. Důležité je, aby elektrody byly zality zkoušenou kapalinou. Výsledná elektrická pevnost se vypočítá jako aritmetický průměr šesti po sobě jdoucích měření, mezi kterými je prodleva 5 minut viz (3). Variační koeficient rozhoduje o tom, zda je olej použitelný a vyhovuje dané normě [11, 54]. Poté se počítá směrodatná odchylka (4) a variační koeficient (5).

$$\overline{U_p} = \frac{\sum_{k=1}^m U_{pk}}{m} \quad (3)$$

$$s = \frac{\sum_{k=1}^m (\overline{U_p} - U_{pk})^2}{m} \quad (4)$$

$$v = \frac{s}{\overline{U_p}} \cdot 100 \quad (5)$$

U_{pk} je hodnota průrazného napětí při k-tém měření [kV/2,5mm]

$\overline{U_p}$ je aritmetický průměr průrazných napětí [kV]

m je celkový počet měření

s je směrodatná odchylka [kV]

v je variační koeficient [%]



Obrázek 4 Elektroodový systém

Tabulka 3 Limitní hodnoty průrazného napětí dle normy ČSN EN 604 22 [18]

Jmenovité napětí transformátoru	Průrazné napětí [kV/2,5 mm]
> 400 kV	> 60
170 kV – 400 kV	> 55
72,5 kV – 170 kV	> 60
< 72,5 kV	> 55
Přístrojové transformátory nad 170 kV	> 60
Přístrojové transformátory pod 170 kV	> 60

Vzhledem k naměřeným výsledkům (viz příloha 4) a [11] je doporučeno používat pro rostlinné oleje hodnoty z normy pro minerální oleje dle tabulky 3.

3.1.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je ukazatelem kvality elektroizolačního materiálu daného elektrického zařízení. Měření ztrátového činitele se provádí dle normy ČSN IEC 250. V praxi se používají k určení $\tan \delta$ můstkové metody, pro vyšší kmitočty (nad kHz) metody rezonanční. V současnosti jsou tyto měřicí metody inovovány tak, aby byly co nejpřesnější a jejich použití nejjednodušší. Nejčastěji je pro měření $\tan \delta$ použit Scheringův můstek.

Scheringův můstek se skládá ze dvou hlavních částí. První část je umístěna ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny a druhá část slouží k vyvažování mimo tento prostor [1]. Kapacitní normál a vzorek tvoří galvanické oddělení. Kapacitním normálem

ve vysokonapěťové části je kondenzátor o kapacitě cca 100 pF, který má zanedbatelné ztráty. Napěťový zdroj musí být sinusového charakteru a mít dostatečný výkon. Pro jednodušší výpočet ztrátového činitele při frekvenci 50 Hz je zvolen $R_4=1000/\pi$ a uvažuje se sériové náhradní schéma [1]. Pro vyvážený můstek poté platí:

$$C_S = C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3} \text{ pF} \quad (6)$$

$$\text{tg } \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (7)$$

C_S a R_S jsou prvky náhradního obvodu dielektrika, pro $R_4=1000/\pi$ a C_4 je

$$\text{tg } \delta = 0,1 \cdot C_4 \quad (8)$$



Obrázek 5 Měřicí zařízení ztrátového činitele

V příloze 3 jsou uvedeny hodnoty naměřených ztrátových činitelů pro sledované kapaliny. $\text{Tg } \delta$ byl měřen v souladu s normou ČSN EN 60247 při napětí 500 V a konstantní frekvenci 50 Hz. Ztrátový činitel měřeného oleje byl odečítán od 20 °C do 90 °C. Můstek byl vyvážen pro každou odečítanou hodnotu $\text{tg } \delta$ a kapacitu C_4 . Z těchto odečtných hodnot byla dále počítána kapacita C_X a permitivita ϵ , která byla vypočtená z kapacity C_X dle následujících rovnic [50, 52, 53]:

$$C_X = \frac{100}{C_4} \text{ pF} \quad (9)$$

C_4 je hodnota vyvažovací kapacity [μF]

$$\epsilon = \frac{C_X}{60} \quad (10)$$

Tabulka 4 Limitní hodnoty ztrátového činitele pro minerální oleje dle normy ČSN EN 604 22 [18]

Jmenovité napětí transformátoru	Ztrátový činitel při 90 °C
> 400 kV	Max. 0,010
170 kV – 400 kV	Max. 0,010
72, 5 kV – 170 kV	Max. 0,015
< 72,5 kV	Max. 0,015
Přístrojové transformátory nad 170 kV	Max. 0,010
Přístrojové transformátory pod 170 kV	Max. 0,015

Volbu limitní hodnoty ztrátového činitele lze provést např. dle normy ČSN EN 61203. Tato norma stanoví ztrátový činitel pro 1. skupinu esterů $\leq 0,01$ při teplotě 20 °C. Pro nepoužitelné estery (norma ČSN EN 61099) je $\text{tg } \delta$ při 90 °C $\leq 0,03$. Dále je možno využít i oleje na bázi přírodních esterů, pro které platí norma ASTM D924. Norma stanoví ztrátový činitel při uvádění zařízení do provozu. $\text{Tg } \delta$ by měl být dle této normy $\leq 0,5$ [11, 45, 46]. Dále se návrhem limitních mezí pro perspektivní oleje použité v transformátorech zabývá [11].

3.1.3 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita je definovaná dle [17] jako převrácená hodnota elektrické vodivosti. Tento ukazatel závisí na vlhkosti, obsahu nečistot, teplotě a měřeném napětí. S rostoucí teplotou se snižuje vnitřní rezistivita a zvyšuje se elektrická vodivost. Měření vnitřní rezistivity se provádí dle normy ČSN EN 602 47. Jedná se o volt-ampérovou metodu. Mezi elektrody, kde je umístěn vzorek, je přiváděno stejnosměrné napětí. Vnitřní rezistivita se určí jako poměr stejnosměrného napětí k ustálenému proudu mezi elektrodami v daném čase [11].

Tabulka 5 Limitní hodnoty vnitřní rezistivity dle normy ČSN EN 604 22

Jmenovité napětí transformátoru	Vnitřní rezistivita při 90 °C [$G\Omega m$]
> 400 kV	Min. 60
170 kV – 400 kV	Min. 60
72, 5 kV – 170 kV	Min. 60
< 72,5 kV	Min. 60
Přístrojové transformátory nad 170 kV	Min. 60

Přístrojové transformátory pod 170 kV	Min. 60
---------------------------------------	---------

Pro syntetické oleje [45] je požadovaná rezistivita při 20 °C ≥ 6 [G Ω m], pro nepoužitelné estery je při 90 °C použitelná hodnota rezistivity ≥ 2 [G Ω m]. Pro perspektivní oleje použité v transformátorech uvádí [11], že při 20 °C by měla být rezistivita pro všechny napěťové třídy > 60 [G Ω m].

3.2 Neelektrické parametry

Neelektrické parametry jsou sledovanými ukazateli stavu elektroizolačních systémů. V následujících odstavcích jsou popsány některé neelektrické parametry jako je například číslo kyselosti, obsah vody, oxidační stabilita či biologická rozložitelnost.

3.2.1 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti [17] je definováno jako množství hydroxidu draselného (KOH), jež je potřeba k neutralizaci organických a anorganických složek v 1 g oleje. Norma ČSN EN 62021-2 udává limitní hodnoty kyselých látek, které jsou obsaženy v izolačních olejích. Během stárnutí olejů se zvyšuje množství kyselých látek. U nových olejů lze také číslem kyselosti určit stupeň rafinace. Potenciometrická metoda či stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B určuje číslo kyselosti. Měřením čísla kyselosti se zabývá norma ČSN EN 62021-1 a přesná hodnota čísla kyselosti se počítá dle normy ČSN ISO 6618 [11, 17].

Tabulka 6 Limitní hodnoty čísla kyselosti dle normy ČSN EN 604 22 [18]

Jmenovité napětí transformátoru	Číslo kyselosti (mg KOH/g)
> 400 kV	Max. 0,03
170 kV – 400 kV	Max. 0,03
72,5 kV – 170 kV	Max. 0,03
< 72,5 kV	Max. 0,03
Přístrojové transformátory nad 170 kV	Max. 0,03
Přístrojové transformátory pod 170 kV	Max. 0,03

Norma ASTM D974 udává číslo kyselosti pro oleje na bázi přírodních esterů. Hodnota čísla kyselosti pro všechny napěťové třídy je $\leq 0,06$ [mg KOH/g] [11].

3.2.2 Obsah vody

Norma ČSN 604 22 určuje rozpustnost vody v oleji. Velké množství obsažené vody v oleji je stav nežádoucí, protože se tím snižuje elektrická pevnost. Vlhkost se dostává do oleje z ovzduší nebo může vzniknout jako produkt oxidačního stárnutí.

Tabulka 7 Limitní hodnoty obsahu vody pro minerální olej dle normy ČSN EN 604 22[18]

Jmenovité napětí transformátoru	Obsah vody (mg/kg)
> 400 kV	< 10
170 kV – 400 kV	< 10
72,5 kV – 170 kV	< 10
< 72,5 kV	20
Přístrojové transformátory nad 170 kV	< 10
Přístrojové transformátory pod 170 kV	< 10

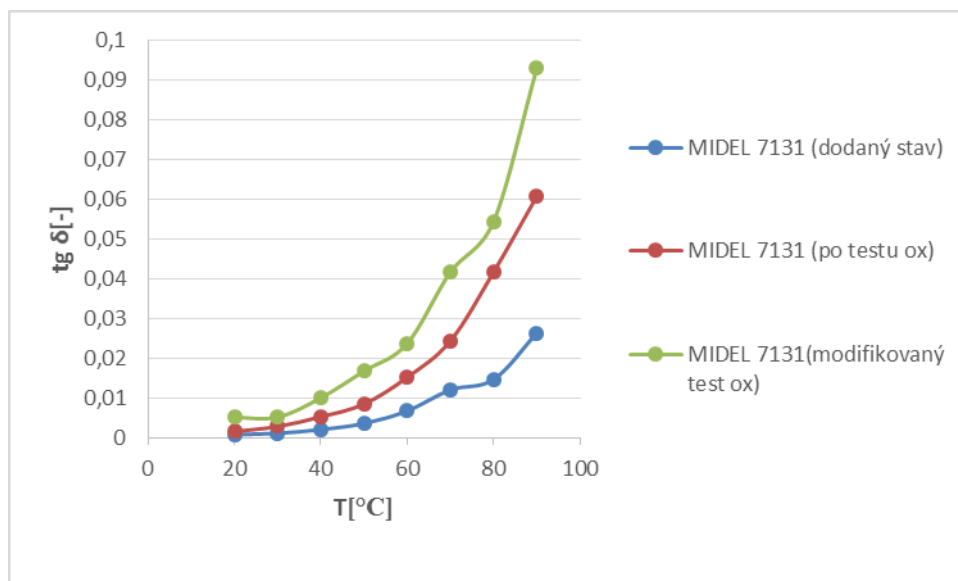
V následující tabulce jsou navrženy meze použitelnosti rostlinných olejů v nových zařízeních.

Tabulka 8 Limitní hodnoty obsahu vody pro rostlinné oleje (nová zařízení) převzato z [11]

	≤ 69 kV	>69 kV < 230 kV	≥ 230 kV < 345 kV	≥ 345 kV
Obsah vody [mg_{H_2O}]	≤ 300	≤ 150	≤ 100	≤ 100

3.2.3 Oxidační stabilita

Oxidační stabilita kapalných izolantů je důležitým parametrem, který je sledován pro napodobení dlouhodobého provozního namáhání. Je zde také možnost porovnávat oxidační stálost pro různé oleje. Během zkoušení je olej namáhán různými činiteli, kteří způsobují stárnutí. Mezi tyto činitele se řadí zvýšená teplota, přítomnost kovů (měď, železo), kyslíku, vzduchu nebo elektrického pole. Výsledná stabilita je hodnocena podle stupně zhoršení elektrických, fyzikálních či chemických vlastností jako je $\tan \delta$, mezipovrchové napětí na rozhraní voda – olej, a další. Příklad zhoršení ztrátového činitele vlivem zkoušení je na obrázku 6 a v příloze 5. Zkouška zrychleným stárnutím nepodává zcela přesnou informaci o skutečné životnosti kapalných izolantů nasazených v provozu [17].

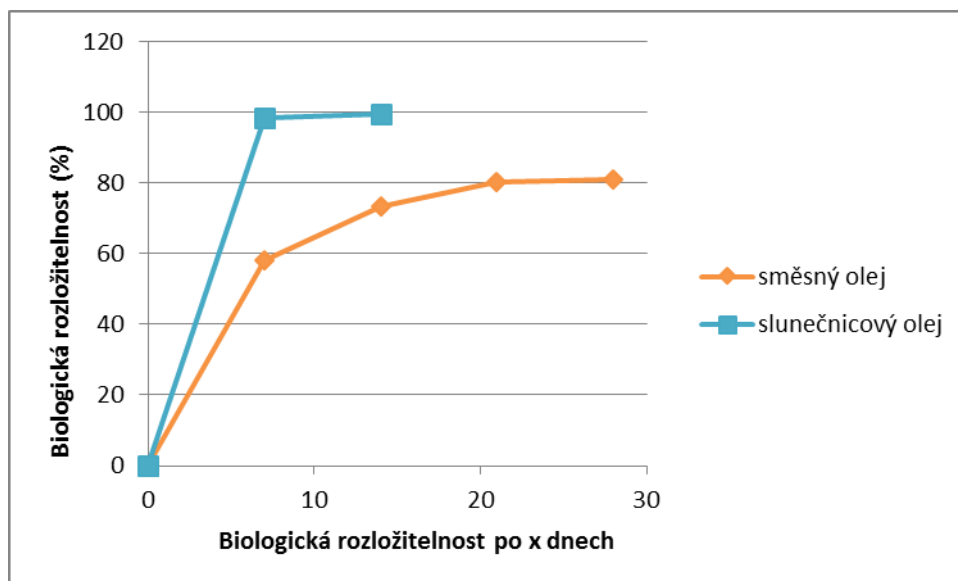


Obrázek 6 Příklad zhoršení tg δ před a po testu oxidační stability

Norma IEC 10/939/Q se zabývá přírodními estery, kterými se nezabývala norma IEC 61125. Test se dle těchto norem provádí tak, že se do uzavíratelné nádoby nalije zkoušený olej v poměru 3:1. Do oleje je vložen měděný plátek. Nádoba, v níž je olej uzavřen, je ohřívána na teplotu 150 °C po dobu 164 hodin. Po 24 hodinách je nutě nádobku na 1 minutu otevřít, poté se musí opět hermeticky uzavřít. Protřepání uzavřené nádobky trvá jednu minutu [22]. Příloha 5 ukazuje hodnoty tg δ před a po testu oxidační stability syntetických a rostlinných olejů.

3.2.4 Biologická odbouratelnost

Biologická odbouratelnost je v současné době velmi důležitým a sledovaným parametrem z hlediska životního prostředí a obnovitelných zdrojů. Standard OECD 301 udává jednu z možných variant měření biologické odbouratelnosti. 28 dní se olej v uzavřených lahvích nechá kultivovat a poté se hodnotí schopnost mikrobů rozložit daný olej na složky uhlíku, kyslíku a různých minerálních solí. Literatura [26] uvádí, že nejlépe biologicky odbouratelný je rostlinný olej, následuje syntetický olej a nejhůře a prakticky neodbouratelný je minerální olej.



Obrázek 7 Biologická rozložitelnost [34]

3.2.5 Bod tekutosti

Bod tekutosti je teplota, při níž má olej tak vysokou hodnotu viskozity, že již neteče. Dle bodu tekutosti se rozdělují oleje na tři třídy. První třída má teplotu tuhnutí do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, druhá do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a třetí do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bod tekutosti je důležitý zejména u transformátorů, které jsou použity v extrémních podmínkách [11]. Tato práce se zabývá zlepšováním alternativních elektroizolačních kapalin, proto jsou v následující tabulce (9) uvedeny body tekutosti olejů na bázi přírodních esterů. Z tabulky je patrné, že oleje na bázi přírodních esterů patří do první skupiny.

Tabulka 9 Body tekutosti převzato z [34]

Přírodní ester	Bod tekutosti [$^{\circ}\text{C}$]
Řepkový olej Promienna	-22
Řepkový olej, neutralizovaný, PREOL	-26
Řepkový olej Vitae d'Oro	-20
Slunečnicový olej Promienna	-16
Slunečnicový olej Vitae d'Oro	-13
Enviro Temp FR 3, sojový olej	-20
Řepkový olej Promienna +1900 mg/kg depr.	-23

Z údajů uvedených v tab. 9 a požadavků provozovatelů transformátorů vystává problém použitelnosti alternativních kapalin při nízkých teplotách. Elektrické a jiné parametry alternativních elektroizolačních kapalin byly již mnohokrát publikovány. Problematika tzv.

studených startů nebyla dosud řešena. Z toho důvodu byla provedena následující úvaha, která ukazuje použitelnost těchto alternativních elektroizolačních kapalin v našich zeměpisných podmínkách, konkrétně pro Plzeňský a Karlovarský kraj. Úvaha se zabývá ochlazováním distribučních transformátorů během výpadku dodávky elektrické energie při okolní teplotě nižší než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cílem úvahy je odhadnout, za jakou dobu po výpadku elektrické energie dojde k ztuhnutí rostlinného oleje v transformátoru a s jakou pravděpodobností to může v Plzeňském kraji nastat.

Teploty

Z tabulky 9 je patrné, že rostlinné oleje mají průměrný bod tuhnutí $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na portále in – počasí [28] byly vybrány nejnižší teploty v zimním období v Plzeňském a Karlovarském kraji od roku 2000 (2003) do 2009. Například na meteorologické stanici v Churáňově byly naměřeny a evidovány tyto teploty:

Tabulka 10 Naměřené minimální teploty Churáňov

	leden	únor	březen	prosinec
2000	-17	-13	-9	-14
2001	-3	-14	-9	-20
2002	-16	-15	-9	-14
2003	-19	-15	-12	-16
2004	-17	-11	-12	-12
2005	-14	-17	-18	-15
2006	-19	-15	-13	-6
2007	-13	-4	-5	-10
2008	-10	-15	-13	-13
2009	-16	-13	-11	-21
2010	-16	-16	-14	-15
2011	-14	-16	-10	-9
2012	-15	-24	-7	-13
2013	-15	-13	-15	-7

Další meteorologické stanice a jejich nejnižší teploty jsou uvedeny v příloze 2. Z tabulek je patrné, že se někdy vyskytly teploty nižší než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak tyto mrazy netrvaly ani v jednom případě déle než tři dny a to pouze v horských oblastech.

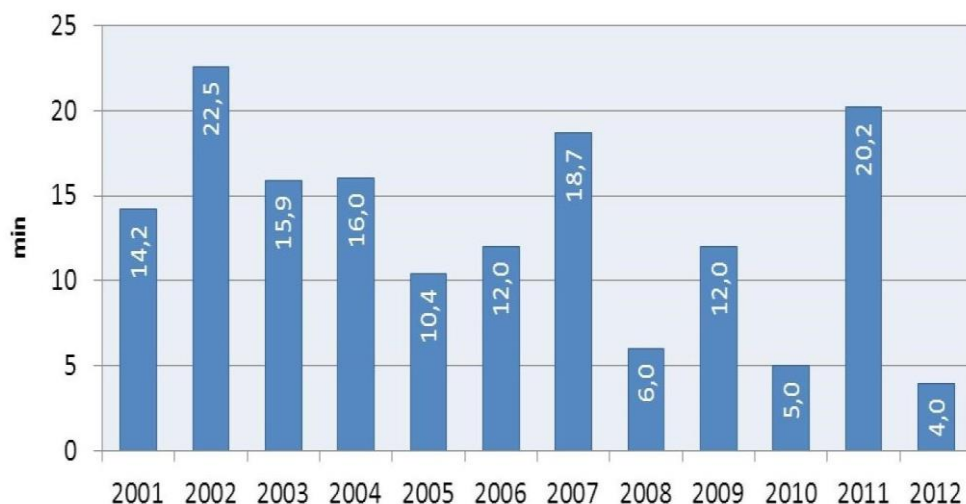
Přerušení dodávky elektrické energie

Norma ČSN EN 50 100 stanoví charakteristiky napětí jako například frekvenci dodávaného napětí, velikost a odchylky dodávaného napětí, kolísání a rychlé změny napětí a krátkodobé a dlouhodobé přerušení dodávaného napětí. Energetický regulační úřad (ERU) monitoruje a vyhodnocuje nepřetržitost dodávky. Sledují se přerušení delší než 3 minut, kratší se zahrnují do kvality napětí. Provozovatel distribuční soustavy musí vést záznamy o přerušení, kde musí uvádět vznik, příčinu vzniku a dobu trvání toho přerušení.

Přerušení jsou typu CAIDI, SAIFI a SAIDI, z těchto parametrů se určuje cena za distribuci elektrické energie. CAIDI je průměrná doba trvání přerušení u zákazníka. SAIFI je průměrný počet přerušení distribuce elektřiny u zákazníka a SAIDI je průměrná souhrnná doba přerušení dodávky u zákazníka, obvykle se udává za jeden rok [29].

Parametr CAIDI se vypočítá:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (11)$$



Obrázek 8 Průměrná doba trvání jednoho přerušení (min) převzato z [30]

Tabulka 11 Ukazatele nepřetržitosti v roce 2011 převzato z [30]

	ČEZ Distribuce	E.ON	PREdistribuce	Česká republika
SAIFI	2,88	2,0	0,65	2,36
SAIDI	296,7	314,4	46,79	268,82
CAIDI [min]	103,15	157,26	72,13	113,87

Z tabulky 11 je patrné, že průměrná doba přerušení u zákazníka je 113,87 minut.

Zjednodušený výpočet ochlazování distribučních transformátorů

Chlazení transformátoru je dáno druhem a cirkulací chladiva. Chladicím médiem může být vzduch, plyn, voda, olej či jiná kapalina s různým bodem vzplanutí. Cirkulace média je buď přirozená nebo nucená (ventilátorem nebo čerpadlem).

Pro zjednodušený výpočet ochlazení transformátoru byl využit Newtonův ochlazovací zákon, který definuje množství tepla, které se vymění mezi proudící tekutinou a pevnou stěnou. Přestup tepla dle Newtonova zákona je dán rovnicí:

$$Q = \alpha A(T_b - T_w) W \quad (12)$$

Součinitel přestupu tepla α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$] je závislý na typu proudící tekutiny, geometrických vlastnostech obtékaných těles a fyzikálně chemických vlastnostech tekutin [31].

Pro výpočet je důležité znát derivaci, která se určí na základě dat z ochlazování. Tyto data nejsou k dispozici, proto byl využit tepelný odpor a oteplení.

$$R = \frac{\Delta T}{P} \Omega \quad (13)$$

Vztah (13) je možné dále upravit:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = P \cdot c \cdot m \quad (14)$$

P je ztracený výkon [W]

c je měrná tepelná kapacita [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]

m je hmotnost tělesa [kg]

Tepelná kapacita je součinem hmotnosti tělesa a měrné tepelné kapacity. Dále je nutné znát oteplení. V této studii byla použita hodnota oteplení 45 °C (při okolní teplotě 30 °C má transformátor teplotu 75 °C). V praxi je možné se setkat s teplotou nižší, například 30 °C. Pro návrh transformátoru se naopak používá hodnota oteplení vyšší, je to nutné kvůli dimenzování stroje.

Příklad zjednodušeného výpočtu ochlazení 30 kVA transformátoru:

Tepelný odpor se vypočítá jako podíl rozdílu teplot a ztraceného výkonu (viz 13):

$$R = \frac{\Delta T}{P} = \frac{45}{1500} = 0,03 \text{ C/W} \quad (15)$$

Ztracený výkon P je cca 1,5 kW, když transformátor 30 kVA má účinnost 95%

Tabulka 12 Měrná tepelná kapacita převzato z [65]

Látka	c [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
olej	1800
železo + měď	858
průměr tepelné kapacity	1332

Tepelná kapacita je součinem váženého průměru měrné tepelné kapacity (tabulka 12) a celkové hmotnosti transformátoru:

$$C = c \cdot m = 1332 \cdot 520 = 692\,640 \text{ J/C} \quad (16)$$

Časová konstanta k ochlazení transformátoru je počítána jako součin tepelného odporu, tepelné kapacity:

$$\tau = R \cdot C = 0,03 \cdot 692\,640 = 20\,779 \text{ s} = 5,7 \text{ h} \quad (17)$$

Za dobu 5τ [64] se teplota ustálí na 75°C v provozu. Transformátor zchladne (ze 75°C na 30°C) za cca 28,5 hodiny. Tento údaj je dále použit v rovnici 19.

V následující rovnici je počítán koeficient k pro teplotu okolí -30°C :

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{-kt} \quad (18)$$

$$T(t) = -30 + (75 - (-30)) \cdot e^{-28,5k} \quad (19)$$

$$45 = -30 + 105e^{-28,5k} \quad (20)$$

$$\ln \frac{75}{105} = -28,5k \quad (21)$$

$$k = 0,0118 \text{ h} \quad (22)$$

Nyní dosadíme teplotu -20°C (kdyby došlo ke ztuhnutí oleje, viz tab. 9):

$$-20 = -30 + 105e^{-0,0118t} \quad (23)$$

$$\ln \frac{10}{105} = -0,0118t \quad (24)$$

$$t = 199,3 \text{ h} = 8,3 \text{ dne} \quad (25)$$

Rostlinný olej s předpokládanou teplotou okolí při ztrátě napájení -20°C dle tab. 10 by poté zatuhl za cca 8 dní.

V Plzeňském a Karlovarském kraji nebyla naměřena teplota nižší než -20°C ve více dnech (mrazy trvaly maximálně tři dny). Pro účely této studie by bylo potřebné vědět, jak dlouho se vyskytovaly teploty pod -20°C (jak dlouho trvala v daném dni teplota pod -20°C). Tyto údaje jsou dostupné pouze za poplatek na stránkách Českého hydrometeorologického

úřadu, proto bylo počítáno ve výpočtu s tím, že teplota -20 °C byla měřena po celou dobu přerušení dodávky elektrické energie. Doba přerušení dodávky elektrické energie (tabulka 11) není delší než dvě hodiny.

Pro výpočet pravděpodobnosti, s jakou bude teplota pod -20 °C na daném území a zda může nastat porucha transformátoru, lze použít statistické rozdělení.

Pro modelování jevů jako je předpověď počasí se používá Weibullovo rozdělení, které je často využito v teorii spolehlivosti [63]. Hustota pravděpodobnosti dvouparametrového Weibullova rozdělení je dána vztahem [63]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \text{ pro } t \geq 0, \quad (26)$$

β je parametr, který ovlivňuje tvar funkce hustoty pravděpodobnosti

η je parametr, který mění měřítko na časové ose

Po modelování jevu pravděpodobnosti překročení bodu tekutosti u transformátorů byl určen časový interval (viz rovnice 25), po který musí teplota okolí překročit -20 °C se statistickou odchylkou $\pm 3\text{ °C}$. Tento časový interval určuje dobu do poruchy v zimním období, tj. od 21.12 do 21.3 za posledních deset let. Pokud za takto stanovené období po dobu 8,3 dne (viz rovnice 25) není teplota pod -20 °C **nepřetržitě překročena**, nemůže nastat porucha pro daný systém. Ze získaných dob do poruchy lze poté odhadnout parametry Weibullova rozdělení a posléze sestavit kumulativní distribuční funkci (viz rovnice 27) [63]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (27)$$

V případě znalosti dat, která by se dala dosadit do rovnic 26, 27, by bylo možné s velkou přesností vypočítat bezporuchovost distribučního transformátoru s rostlinným olejem v zimním období.

Kromě statistického Weibullova rozdělení lze sestavit výpočet pravděpodobnosti poruchy daného zařízení s využitím vztahů podmíněné pravděpodobnosti, který je uveden na následujících řádcích.

Z tabulky 10 lze vypočítat pravděpodobnost, s jakou bude teplota pod -20 °C v Churáňově:

$$P_A = \frac{|A|}{\omega} \quad (28)$$

A je počet příznivých jevů

ω je počet všech jevů

$$P_A = \frac{|A|}{\omega} = \frac{3}{52} \quad (29)$$

Dále lze vypočítat pravděpodobnost, že přerušení dodávky elektrické energie bude delší než jeden den (viz tab. 11):

$$P_B = \frac{|B|}{\omega} = \frac{0}{13} = 0 \quad (30)$$

Pravděpodobnost, že by došlo ke ztuhnutí rostlinného oleje v blízkosti meteorologické stanice v Líních je dána výpočtem podmíněné pravděpodobnosti:

$$P = P_A \cdot P_B = \frac{3}{52} \cdot 0 = 0 \quad (31)$$

Z toho lze odvodit, že s nulovou pravděpodobností by došlo ke ztuhnutí rostlinného oleje na sledovaném území.

Příkladem tohoto předpokladu bylo měření, které bylo prováděno pracovníky FEL, ZČU v Plzni na několika transformátorech ČEPS o výkonu 350 MVA. Byla sledována teplota transformátoru při odstávce po dobu měření, tj. 6 hodin. Odstávka započala 2 hodiny před vlastním měřením. Teplota transformátorů při odstavení se pohybovala okolo 36°C, okolní teplota byla 7°C. Teplota byla měřena přímo na transformátorech zabudovanými termočládky a online diagnostickým systémem Areva. Termočládky umístěné na transformátoru nevykázaly po dobu 6 hodin žádnou změnu teploty. Online diagnostický systém zaznamenal mírné zvýšení teploty po odstavení transformátoru způsobené vypnutím chlazení (ODAF). Po osmi hodinách od odstavení transformátoru se teplota nelišila od počáteční o více než 0,1 °C [32,33].

Jak již bylo zmíněno, jedním z důvodů nepřesného výpočtu byl nedostatek dat. Portály o počasí neposkytují informace o časovém průběhu teplot, většinou ukazují pouze nejnižší nebo nejvyšší teplotu za daný den. Informaci o teplotě v průběhu hodin poskytuje pouze Český hydrometeorologický úřad za poplatek. Dále nelze získat od distributorů elektrické energie přesné doby a počet přerušení dodávky energie. V jimi vydaných oficiálních zprávách lze vyčíst jen průměrné doby přerušení, nikoliv nejdelší dobu přerušení. K přesnému výpočtu je nutné znát ztráty v železe, hysterezní ztráty, ztráty v mědi, hmotnost transformátoru, oteplení a další. Tyto informace výrobci transformátorů neposkytují, protože se jedná o interní data.

V této studii byla použita data ze štítků transformátoru a oteplení vycházelo z reálných teplot při provozu transformátoru. Cílem této úvahy bylo dokázat, že výrobci transformátorů

mohou bez nebezpečí ztuhnutí rostlinného oleje provozovat transformátory na našem území mimo horských oblastí, kde dochází častěji v zimním období k výpadkům elektrické energie a teploty zde klesají pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Transformátory plněné rostlinnými oleji lze provozovat v nižších nadmořských výškách, kde je téměř vyloučeno, že by došlo ke ztuhnutí rostlinného oleje.

4 Alternativní elektroizolační kapaliny

Následující odstavce jsou věnovány popisu biologicky odbouratelných elektroizolačních kapalin, které v systému olej – papír nahrazují v současnosti používané minerální oleje.

4.1 Návrh EIS s biologicky odbouratelnou kapalinou

Jako náhrada nevhodných minerálních olejů přichází v úvahu rostlinné nebo syntetické oleje.

Syntetické oleje

V současné době již existují normy [45,46, 47], které se zabývají oleji na bázi syntetických esterů.

Norma ČSN EN 61203 se zabývá syntetickými organickými estery a jejich úpravou pro použití v transformátorech. Tyto alternativní oleje jsou rozděleny do tří skupin. V první skupině jsou kapaliny, které se dají použít pro trvalý provoz, v druhé skupině jsou estery, které se musí ještě vhodně upravit, aby se daly použít v provozu. Nepoužitelné estery v elektrotechnické aplikaci jsou zařazeny ve třetí skupině [45]. Další normy, které se těmito alternativními kapalinami zabývají, jsou například ČSN EN 61099 ed.2, IEEE Std C57.147-2008. ČSN EN 61099 ed. 2 je o specifikaci nepoužitelných syntetických organických esterů pro elektrotechnické účely, které se získávají chemickým zpracováním a fyzikální úpravou mastných kyselin a polyalkoholů [46]. Zmíněná norma IEEE Std C57.147-2008 je neustále doplňována o nové poznatky, které plynou z výzkumů kapalin na bázi organických esterů. Dále norma udává kritéria a požadavky pro používání oleje v transformátorech, které jsou rozděleny dle jmenovitého napětí do čtyř skupin [11, 47].

Syntetické kapaliny se začaly používat ve třicátých letech dvacátého století. Jednalo se však o silně toxické tekutiny – chlorované bifenyly a chlorované benzeny, které měly nízkou biologickou odbouratelnost. Tyto kapaliny byly v roce 1970 zakázány, dnes používají někteří výrobci transformátorů nově vyvinuté syntetické kapaliny na bázi esterů, jako je například MIDEL 7131. MIDEL 7131 byl speciálně vyvinut jako bezpečná alternativa k tradičním minerálním olejům, je výjimečný vynikající tolerancí vlhkosti, vyšší požární bezpečností, netoxicitou, nekorozivitou a ochranou životního prostředí. MIDEL lze použít například v distribučních transformátorech v městských oblastech a budovách, v silových transformátorech do 238 kV a trakčních transformátorech [51].

V současnosti jsou komerčně nabízeny i další syntetické kapaliny jako jsou Repsol moto

racing 4T 10W50 nebo BP Visco 7000 0W-40 [66, 67]. Avšak tyto oleje jsou použitelné v motorových vozidlech a nedají se použít v transformátorech.

Dnes se kromě syntetických olejů jeví jako perspektivní i rostlinné oleje.

Rostlinné oleje

Rostlinné oleje jsou jednou ze studovaných alternativ pro náhradu v distribučních transformátorech. Mají řadu výhod jako to, že jsou obnovitelným zdrojem, jsou lehce biologicky odbouratelné a mají vysoký bod vzplanutí. Přeskokové napětí splňuje i normu pro minerální oleje (viz příloha 4). Rostlinné oleje mají mnohem vyšší schopnost vázat vodu, proto je přeskokové napětí těchto olejů méně citlivé na přítomnost vlhkosti a vody.

Mají také řadu nevýhod – vyšší viskozitu, vyšší, ale stále akceptovatelný tg δ a jiné.

Zástupci rostlinných olejů jsou uvedeny v kapitole 2. 1. 5., na území České republiky lze pěstovat pouze slunečnici (*Helianthus annuus*) a řepku olejnou (*Brassica napus*). Ve světě je pěstována palma olejná, dále je použitelný olej ze sójových bobů. Mezi výrobce rostlinného oleje do transformátorů patří například Nebraska Public Power District, ABB, BIOTRANS. Společnost ABB vyvinula kapalinu BIOTEMP. BIOTEMP je dielektrická izolační tekutina, která je vyrobena z olejů, které obsahují více než 75 % mono – nenasycené mastné kyseliny jako je slunečnicový olej. Podobné vlastnosti jako BIOTEMP má i MEŘO a MIDEL EN. Tyto oleje mají řadu výhod, pro které jsou používány. Například to, že jsou biologicky odbouratelné do 21 dnů a minimalizují znečištění ovzduší. Vykazují vynikající izolační vlastnosti při vysoké teplotě, jsou schopny absorbovat více vlhkosti a vody, čímž chrání před stárnutím a tím dokáží zvýšit životnost pevné izolace na bázi celulózy používané v transformátorech [48, 49]. S těmito kladnými vlastnostmi se lze také setkat i u sójových olejů. Olej MEKO [50] ze stromu *Pongamia*, který roste na Srí Lance a Indii je dalším sledovaným olejem. Byl proveden výzkum vlastností oleje MEKO a porovnání se syntetickým olejem MIDEL 7131. Výzkum prokázal, že jsou fyzikální i chemické vlastnosti MEKO srovnatelné s MIDEL 7131.

Na základě výsledků KET FEL [58, 59, 60], kdy byly porovnány komerčně dostupné syntetické a rostlinné oleje (řepkový a slunečnicový), a to jak v potravinářské kvalitě, tak i ve stavu vstupní suroviny pro výrobu bionafty (s i bez inhibitorů). Je zřejmé, že jejich vlastnosti jsou obdobné. Lze je proto, po vyřešení dílčích problémů a stanovení konkrétních limitů, použít v transformátorech jako náhradu olejů minerálních. S ohledem na jejich oxidační stabilitu je třeba používat rostlinné oleje pouze v hermetizovaných transformátorech.

5 Měření parametrů alternativních elektroizolačních kapalin

Pro prokázání možnosti náhrady minerálních olejů je nutno provést řadu experimentů a měření. Řada experimentů je prováděna ve světě [56, 61, 62] i v rámci projektu TAČR (TA 03020251 aktuálně řešen na FEL). Pro ověření vlastností rostlinných a syntetických olejů byly v rámci řešení diplomové práce provedeny následující experimenty a měření.

Byly provedeny dva experimenty. Prvním byla tepelná degradace vzorků vybraných olejů a druhým byl zjednodušený test oxidační stability.

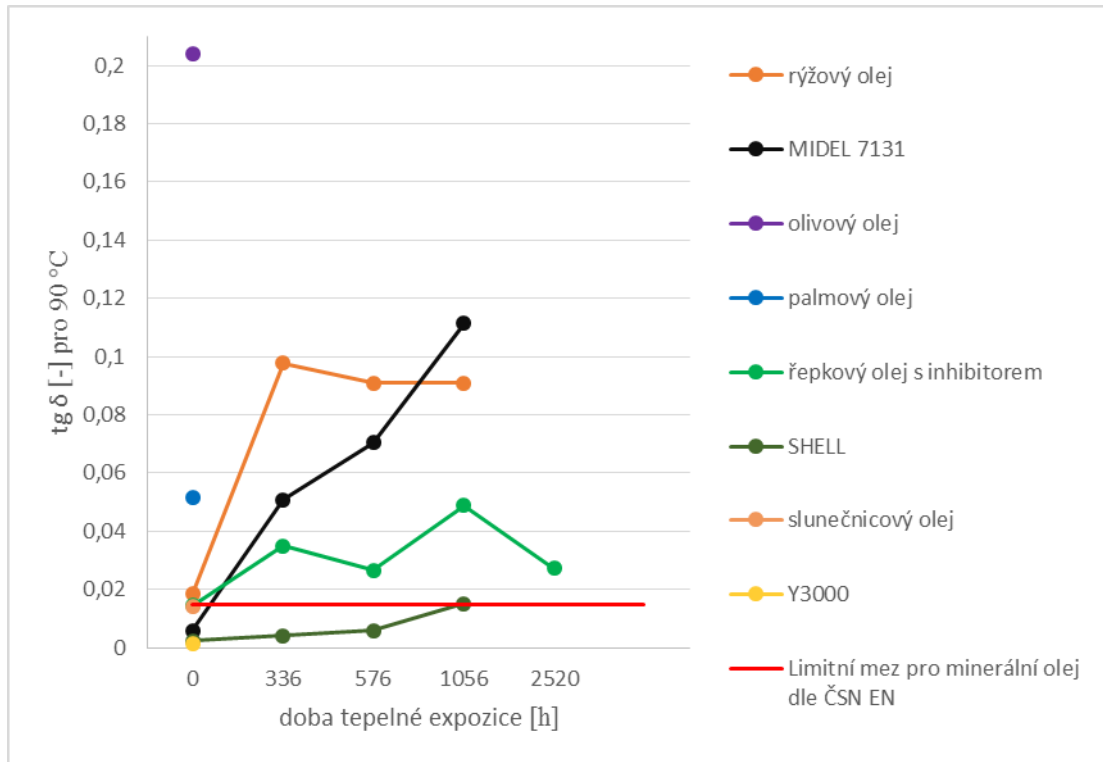
Tepelná degradace olejů

V prvním experimentu byly měřeny hodnoty ztrátového činitele nejdříve pro oleje v dodaném stavu a poté i pro tepelně degradované oleje.

Byly měřeny oleje na bázi organických esterů (rýžový, slunečnicový s inhibitorem, řepkový s inhibitorem, palmový, olivový), na bázi syntetických esterů (MIDEL 7131) a oleje na ropné bázi (Y3000, LYRA, SHELL).

Experiment probíhal tak, že pro výše zmíněné oleje byl měřen ztrátový činitel a vnitřní rezistivita v dodaném stavu. Poté se vzorek nechal vysušit po dobu 24 hodin při 100 °C. Po vychladnutí byly změřeny zmíněné parametry. Následovalo uložení do horkovzdušné sušky Venticell na 336 hodin při teplotě 140 °C. Po vyjmutí z pece a zchlazení na pokojovou teplotu byl měřen $\text{tg } \delta$. Po změření hodnot byl olej nalit zpět do lahve a následovala další expozice 240 hodin při 140 °C. Po uplynutí této doby byl vzorek po aklimatizaci opět proměřen. U vybraných vzorků bylo měřeno i přeskokové napětí. Tento postup se u vybraných olejů opakoval po 480 hodinách (140 °C), 1464 hodinách (110 °C) a 3288 hodinách (110 °C).

Výsledkem bylo potvrzení předpokladu, že vlivem tepelné degradace dojde u olejů ke zhoršení ztrátového činitele, vnitřní rezistivity i přeskokového napětí. V následujícím obrázku (číslo 9) je patrné zhoršení ztrátového činitele vlivem tepelné degradace v čase.



Obrázek 9 Ztrátový činitel závislý na době tepelné expozice

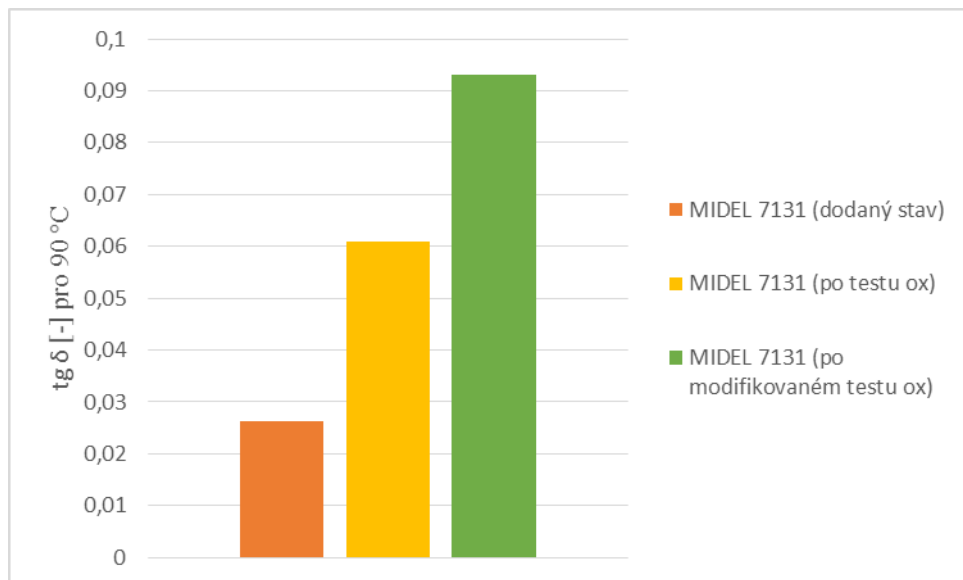
Z obr. 9 je patrné, že nejstabilnější olej vzhledem k tepelné degradaci je stále olej minerální. Pro přehlednost je uvedena v grafu limitní mez dle normy ČSN EN 604 22 pro minerální oleje. V příloze 3 jsou uvedeny další naměřené hodnoty ztrátových činitelů v závislosti na době tepelné expozice. U olivového a palmového oleje byly naměřeny nejvyšší ztrátový činitelé, proto se nenechaly tepelně stárnout. V dodaném stavu měl MIDEL 7131 téměř stejný ztrátový činitel jako SHELL a Y 3000. Po 336 hodinách tepelného stárnutí se zhoršil $\text{tg } \delta$ u všech olejů, nejpatrnější zhoršení bylo u rýžového oleje. Rýžový olej měl po dalších 240 hodinách téměř stejný ztrátový činitel. Rostlinný řepkový olej s inhibítorem měl v průběhu tepelné expozice nižší $\text{tg } \delta$ než syntetický olej MIDEL 7131. Ten měl po 1056 hodinách tepelné expozice hodnotu $\text{tg } \delta$ 0,11135. Řepkový olej s inhibítorem měl při 90 °C $\text{tg } \delta$ 0,0489. Je patrné, že přidáním inhibitoru do rostlinného oleje se výrazně vylepší jeho vlastnosti a zlepší se jeho stabilita.

Zjednodušený test oxidační stability

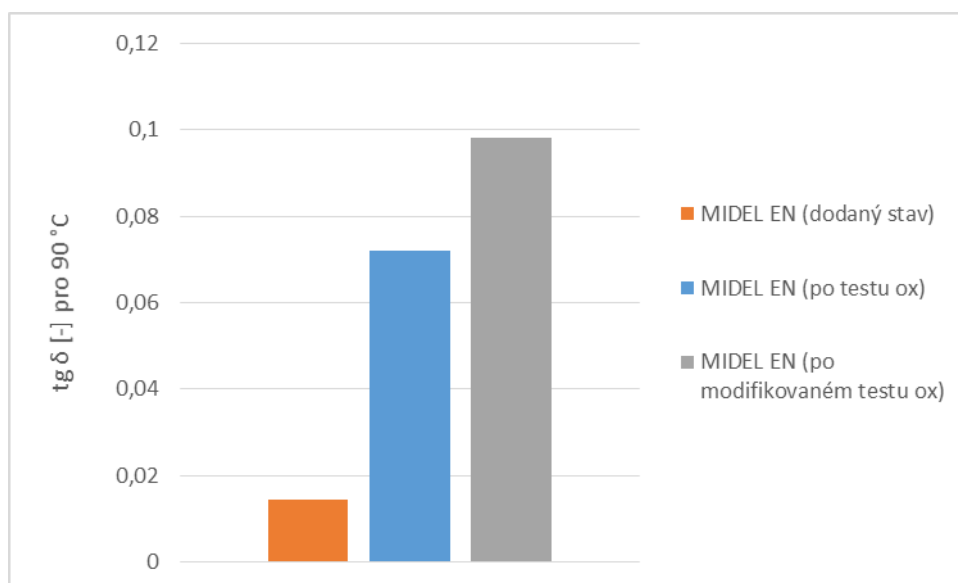
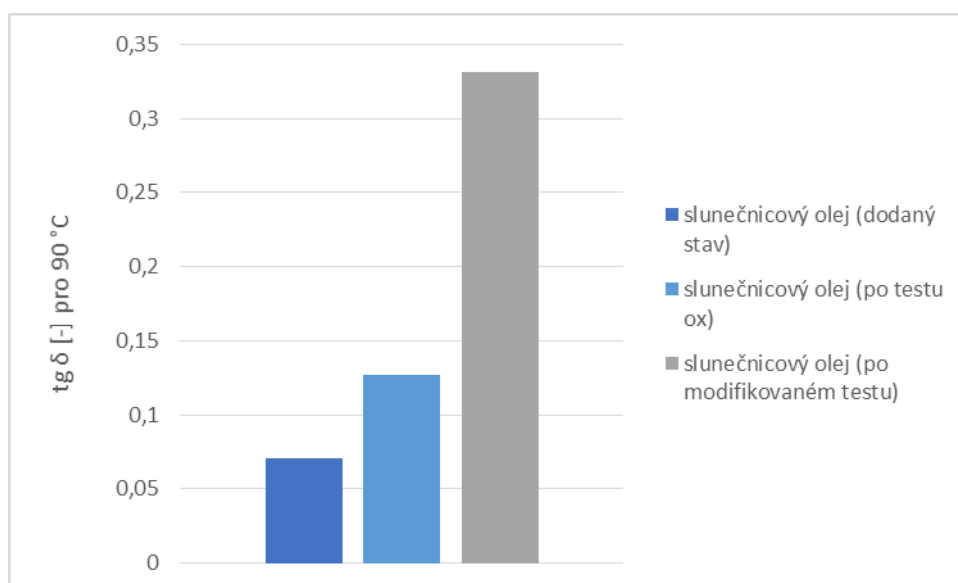
Pro tento experiment byly vybrány vzorky syntetických a rostlinných olejů. Mezi měřenými oleji byly MIDEL 7131, MIDEL EN a slunečnicový olej bez a s inhibítorem (antioxidant fenolického typu).

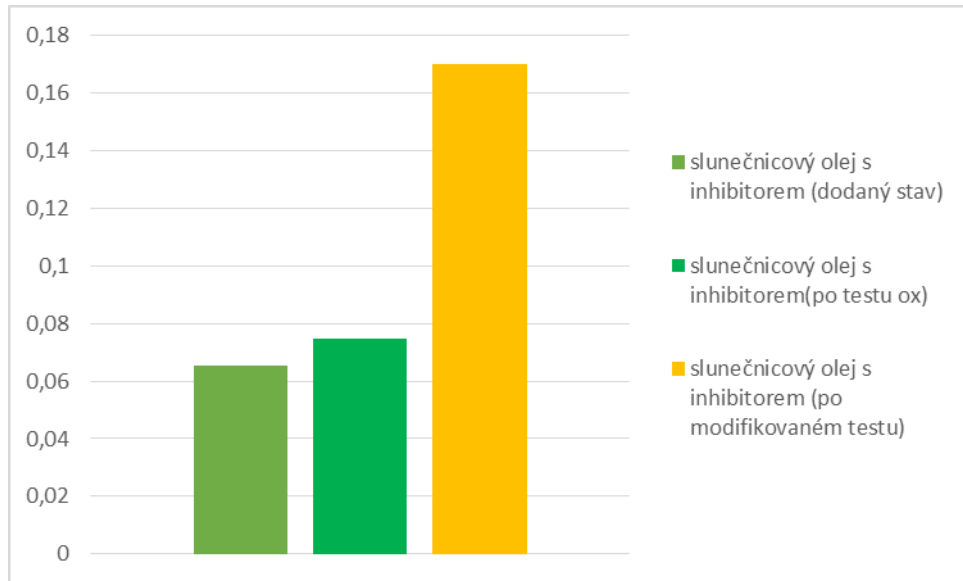
Postup měření oxidační stability na vybraných vzorcích probíhal tak, že byl nejdříve změřen ztrátový činitel a vnitřní rezistivita pro dodaný stav, poté byly tyto parametry měřeny pro oleje po testu oxidační stability (kapitola 3. 2. 3) a po modifikovaném testu oxidační stability. Modifikace spočívala v tom, že poměr vzduchu a oleje nebyl 1:3, ale 1:1.

Z naměřených hodnot je patrné, že se po testu oxidační stability zhoršil u všech měřených vzorků ztrátový činitel. Dále je patrné, že přidáním inhibítora do rostlinného oleje se zlepšil jeho parametry.

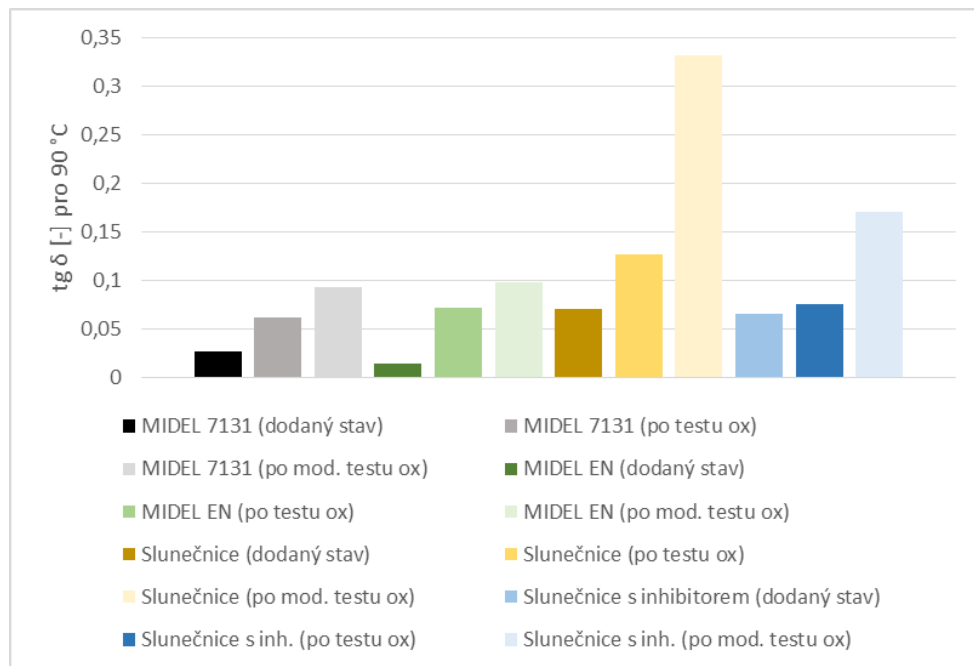


Obrázek 10 Ztrátový činitel MIDEL 7131

**Obrázek 11 Ztrátový činitel MIDELE EN****Obrázek 12 Ztrátový činitel slunečnicového oleje bez inhibitoru**



Obrázek 13 Ztrátový činitel slunečnicového oleje s inhibitorem



Obrázek 14 Ztrátový činitel zkoumaných olejů v různých stavech

V dodaném stavu měl nejmenší ztrátový činitel MIDEL EN, poté následoval MIDEL 7131. Slunečnicový olej s inhibitorem měl nižší $\text{tg } \delta$ než slunečnicový bez inhibitoru. Po testu oxidační stability se zhoršily parametry zkoumaných olejů. Nejvýraznější zhoršení $\text{tg } \delta$ vykazoval MIDEL EN, u něhož došlo ke zvýšení $\text{tg } \delta$ o 0,05758. Nejméně patrné zhoršení bylo u slunečnicového oleje s inhibitorem. Nejvyšší ztrátový činitel měl slunečnicový olej bez inhibitoru ($\text{tg } \delta = 0,33156$), poté následoval slunečnicový olej s inhibitorem ($\text{tg } \delta = 0,16982$). Nepatrný rozdíl v hodnotách ztrátového činitele byl u olejů MIDEL. MIDEL EN na bázi

přírodních esterů měl $\text{tg } \delta$ 0,09827. Syntetický olej MIDEL 7131 byl $\text{tg } \delta$ 0,09311. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 5.

6 Závěr

Na začátku této práce byly popisovány elektroizolační systémy používané ve vysokonapěťové technice. Jedno z možných rozdělení je na EIS točivých a netočivých strojů. Detailněji byl popisován EIS transformátorů – systém olej – papír.

V třetí kapitole byly řešeny meze použitelnosti systému olej – papír. Limitní hodnoty přeskokových napětí minerálních a rostlinných olejů jsou téměř stejné, je proto doporučeno používat pro oleje na bázi organických esterů stejné normy jako pro minerální oleje. Dále byly řešeny mezní hodnoty ztrátových činitelů. Norma ČSN EN 604 22 se zabývá minerálními oleji, pro oleje na bázi syntetických esterů jsou již stanoveny normy, jako například ČSN EN 601203. Z naměřených hodnot (viz příloha 3) je patrné, že hodnoty ztrátových činitelů pro minerální, rostlinné a syntetické oleje jsou velmi rozdílné. Také byla zmíněna vnitřní rezistivita, číslo kyselosti, obsah vody, oxidační stabilita, biologická odbouratelnost a bod tekutosti.

Součástí kapitoly o parametrech olejů byla i úvaha o použitelnosti rostlinných olejů. Cílem této úvahy bylo poukázat na skutečnost, že rostlinné oleje jsou vhodné k použití v distribučních transformátorech na území České republiky. Byl proveden zjednodušený výpočet, jehož cílem bylo dokázat, že při přerušení dodávky elektrické energie a výpadku transformátoru, nedojde v zimním období ke ztuhnutí rostlinného oleje, kterým byl naplněn transformátor.

Návrh nového elektroizolačního systému olej – papír lze realizovat nahrazením minerálních olejů a celulóзовé lepenky. Perspektivními náhradami, které jsou v této práci uvedeny, jsou alternativní elektroizolační kapaliny – oleje na bázi přírodních nebo syntetických esterů. Tyto tekutiny jsou získávány z obnovitelných zdrojů, což je jejich výhodou. Také zajišťují bezpečnost a šetrnost k životnímu prostředí. Jak již bylo zmíněno, s ohledem na oxidační stabilitu rostlinných olejů je lze použít v hermetizovaných transformátorech.

Poté byla provedena diagnostika minerálních, syntetických a rostlinných olejů. U těchto kapalin byl měřen ztrátový činitel v závislosti na tepelné degradaci, elektrická pevnost a oxidační stabilita. Měření probíhala dle platných norem v laboratořích KET. V příloze 3 jsou uvedeny tabulky a grafy, které ukazují závislost ztrátového činitele na tepelné expozici. Z naměřených hodnot je patrné, že minerální oleje mají nejnižší ztrátový činitel. Horší tg δ má syntetický olej MIDEL 7131. Nejhorší ztrátový činitel mají rostlinné oleje. Snížení ztrátového činitele u rostlinných olejů je možné přidáním inhibitorů. Dále byl proveden experiment s rýžovým olejem. Tento olej vykazoval velmi dobré hodnoty parametrů v dodaném stavu, proto byl rýžový olej podroben vysušení a tepelné degradaci. Z hodnot je patrné, že se výrazně

zhoršily parametry vlivem tepelné degradace. Vzhledem k těmto výsledkům a nemožnosti pěstování rýže na území České republiky a Evropy, je rýžový olej nepoužitelný pro praxi.

V příloze 4 jsou uvedeny tabulky a grafy přeskových napětí zkoumaných olejů. Z naměřených hodnot je patrné, že přeskové napětí je nejvyšší pro minerální oleje. Kromě minerálních olejů splňoval normu ČSN EN 604 22 také MIDEL 7131, slunečnicový olej s inhibítorem a řepkový olej s inhibítorem, jejichž průměrná hodnota průrazné napětí byla větší než 60 kV/2,5mm. Vysušený rýžový olej vykazoval vysoké průrazné napětí, téměř jako minerální olej SHELL. Olivový a palmový olej měl velmi nízké přeskové napětí.

Druhým experimentem bylo měření oxidační stability syntetických a rostlinných olejů. Byly studovány oleje - MIDEL 7131, MIDEL EN a slunečnicový olej s a bez inhibítoru. Z grafů a naměřených hodnot je patrné, že nejlepší hodnoty $\text{tg } \delta$ má olej v dodaném stavu. Zhoršení ztrátového činitele je patrné u tepelně degradovaných vzorků a u olejů po testu oxidační stability.

Naměřené parametry alternativních olejů ukazují, že výzkumy a testování olejů na bázi esterů musí i nadále pokračovat. Je nutné stále vylepšovat jejich vlastnosti, například přidáváním inhibítorů a hledáním nových směsí, které by plně nahradily minerální oleje.

Seznam literatury

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČESKÉ REPUBLIKY. *Integrovaný registr znečišťování: Fluorid sírový SF₆* [online]. [cit. 2014-07-10]. Dostupné z: <http://www.irz.cz/node/40>
- [3] ÖZGÜR. *TECHNICAL DOCUMENTATION: Comparison of Resin Rich and VPI system* [online]. [cit. 2014-07-10]. Dostupné z: <http://www.ozgurbobinaj.com.tr/dosyalar/tr/pdf/comparison-of-resin-rich-and-vpi-system.pdf>
- [4] ČSN EN 60085. *Elektrická izolace: Tepelné hodnocení a značení*. ed. 2 (330250). Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2008. Dostupné z: <http://shop.normy.biz/detail/81628>
- [5] ČSN EN 60216-6 ed.2. *Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti: Část 6: Určení indexů tepelné odolnosti (TI a RTE) izolačního materiálu metodou pevně stanovených časů*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2007. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Vysledky.aspx>
- [6] Epoxy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>
- [7] Elektroizolační lepenka (Prešpan). TECHLEP. *TechLep* [online]. 2011 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.techlep.cz/elektroizolacni-lepenka.html>
- [8] Elektroizolačné materiály: Elektrotechnické lepenky. DLX. *DLX - Elektroizolačné materiály* [online]. 2008 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: http://www.dlx.sk/presspany_05.php
- [9] ARCO technik s.r.o. - Lignostone, tvrzené bukové dřevo DIN. MAREK, Vlastimil. ARCO TECHNIK S.R.O. <http://www.arco.cz/lignostone-tvrzene-bukove-drevo-din-7707> [online]. 2014 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.arco.cz/lignostone-tvrzene-bukove-drevo-din-7707>
- [10] Slovník pojmů: Celulóza. BEZGLUTEN. *Bezlepkové potraviny BEZGLUTEN* [online]. 2011 [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <http://www.bezgluten.cz/slovník/celuloza.html>
- [11] ŠIRŮČEK, Martin. *Zlepšování parametrů výkonových transformátorů*. Plzeň, 2013. Dostupné z: http://www.fel.zcu.cz/uredni-desky/UD_PhD/Probíhající_SDZ_a_obhajoby/Autoreferaty/131218_autoreferat_Sirucek_Martin.pdf. Disertační práce. ZČU Plzeň, FEL, Katedra technologií a měření.
- [12] Celulóza: organická látka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2014 [cit. 2014-07-16]. Dostupné z: http://sk.wikipedia.org/wiki/Celul%C3%B3za_%28organick%C3%A1_1%C3%A1tka%29
- [13] Fluorid sírový - Arnika. ARNIKA. *Arnika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2014-07-16]. Dostupné z: <http://arnika.org/fluorid-sirovy>
- [14] Fluorid sírový. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2013 [cit. 2014-07-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Fluorid_s%C3%ADrov%C3%BD
- [15] Oleje. *Oleje* [online]. [cit. 2014-07-21]. Dostupné z: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/Olej.htm>
- [16] Estery. *Chemie pro 9. ročník* [online]. [cit. 2014-07-21]. Dostupné z:

<http://www.komenskeho66.cz/materialy/chemie/WEB-CHEMIE9/estery.html>

[17] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9

[18] ČSN EN 604 22 ed.2. *Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních - Návod pro kontrolu a údržbu*. 2. vyd. Český metrologický institut: Český metrologický institut, 2013. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=93735>

[19] VA TECH TRANSMISSION & DISTRIBUTION GMBH & CO KEG. *VA TECH EBG Transformatoren: MIDEL Transformator · MIDEL Transforme* [online]. [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/The%20First%20Midel%207131%20Insulated%20238kV%20Power%20Transformer.pdf>

[20] EDEN TRANSFORMER OIL. *MIDEL 7131 Transformer Insulating Liquid* [online]. 2012 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://www.edenoil.co.uk/component/virtuemart/57/6/transformer-insulating-liquid/transformer-midel-7131-25-detail?Itemid=0>

[21] FREUDENRICH, Craig. INFOSPACE LLC. *HowStuffWorks: How Oil Refining Works* [online]. 1998-2015 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/oil-refining.htm>

[22] IEC 10/939/Q. *Unused hydrocarbon based insulating liquids: Test methods for evaluating the oxidation stability*. International Electrotechnical Commission: International Electrotechnical Commission, 2014. Dostupné z: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:52:0:::FSP_ORG_ID,FSP_DOC_ID,FSP_DOC_PIECE_ID:1246,155947,283737

[23] MITSUBISHI ELECTRIC POWER. *Mitsubishi Electric Power Products, Inc.: SF6 Gas Insulated Transformers* [online]. Mitsubishi Electric Corporation., 2014 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.meppi.com/Products/Transformers/Pages/SF6Gas.aspx>

[24] AVONMORE ELECTRICAL. *Avonmore Electrical: Vacuum Pressure Impregnation (V.P.I.)* [online]. Irsko, 2014 [cit. 2014-07-28]. Dostupné z: <http://www.avonmore-electrical.com/vacuum-pressure-impregnation->

[25] BEZ GROUP. *Olejové distribuční transformátory* [online]. 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.bez.sk/sk/produkty-a-riesenia/olejove-distribucne-transformatory/bez-transformatory>

[26] TRNKA, Pavel, Vaclav MENTLIK a Michal SVOBODA. Ecologically acceptable insulating liquids for electrical appliances. *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. IEEE, 2014, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2014.6893121. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6893121>

[27] M&I MATERIALS. *MIDEL* [online]. 2014 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: http://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Midel_Product_Guide_Low_Res_SN.pdf

[28] INMETEO, s.r.o. *IN - POČASÍ: Archiv počasí, klima České republiky* [online]. 2014 [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/archiv/>

[29] TESAŘOVÁ, M. Projektování energetických celků: Přednášky z předmětu PEC, FEL – ZČU, kat. energetiky a ekologie. 2014

[30] ŠEFRÁNEK, Jan. Regulace kvality elektřiny. In: *Energetický regulační úřad: Kvalita dodávek a služeb* [online]. Špindlerův Mlýn, 2013 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http>

- %3A%2F%2Fwww.cez.cz%2Fedee%2Fcontent%2Ffile%2Fo-spolecnosti%2Fdcerine-spolecnosti%2Fcez-mereni%2Fkonference_2013%2F03_eru_sefranek_cz.pptx&ei=683AVP6gIYPNyGpUj4GQCw&usg=AFQjCNEzwDBx73ETthJ5AAGQdCq0zRDDJg&bvm=bv.83829542,d.bGQ
- [31] 5. Sdílení tepla. In: *Základy chemických technologií* [online]. Olomouc, 2011-2013 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://aplchem.upol.cz/predmety/ZCHT/SKRIPTA/2014/Kapitola5.pdf>
- [32] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J. Sledování stavu izolačních systémů transformátorů ČEPS. ČEPS a. s., 2014.
- [33] MENTLÍK, V., TRNKA, P., DONČUK, J., SVOBODA, M., SOUČEK, J., TOMÁŠKOVÁ, T. Analýza vlivů chodu transformátorů ČEPS. Výzkumná zpráva. ČEPS a. s., 2013. ZČU
- [34] Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí, TA03020251, Dílčí výzkumná zpráva, 2014
- [35] ELPRO - ENERGO. *Olejové transformátory: Jádru* [online]. Praha [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/jadro/>
- [36] ČSN EN 60216-8. *Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti: Část 8: Pokyny pro výpočet charakteristik tepelné odolnosti s využitím zjednodušených postupů*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2013. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Vysledky.aspx>
- [37] MEŘO - Biopaliva [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://biopaliva.webgarden.cz/rubriky/mero>
- [38] INELSEV MOTORY A.S. *Opravy cívek, reaktorů a tlumivek* [online]. Most, 2013 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: http://www.inelsevmotory.cz/index.asp?list=opravy_civek_tlumivek
- [39] ELECTRICAL4U. *Transformer Insulating Oil and Types of Transformer Oil* [online]. 2011 - 2013 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>
- [40] PCBDISPOSALINC.COM. *PCB management, PCB removal, PCB destruction, transformer replacement and waste disposal - Toronto, Ontario, Canada: MINERAL OIL TRANSFORMERS* [online]. Durham Region, Toronto, Ontario, Canada, 2003, 2015 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: http://www.pcbdisposalinc.com/images/pdfs/mineral_oil_transformers.pdf
- [41] WEBALL S. R. O. *Využití a zpracování ropy: Ropa i výrobky z ní jsou základním palivem pro dopravu a surovinou* [online]. 2004 - 2014 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.ropa.cz/vyuziti-a-zpracovani-ropy/>
- [42] M&I MATERIALS LTD. *Transformer Oils: Properties of Synthetic and Natural Ester Transformer Oils* [online]. [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.midel.com/about-us/resources/transformer-oil>
- [43] GAURA, Radovan. SGB-SK, spol. s r. o. *Olej* [online]. Bratislava [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.sgbsk.sk/olejove-transformatory/zakladny-popis/olej/>
- [44] PSLIB.CZ. *Průmyslová škola, Liberec* [online]. Liberec, 2006 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0CE>

wQFjAH&url=https%3A%2F%2Fwww.pslib.cz%2Fpe%2Fskola%2Fstudijni_materialy%2Fbiomasa%2Fme%25F8o.doc&ei=fsXIVLn1K8KXgwTHkYDYCg&usg=AFQjCNEoyruUqv_Bt45NjmkDJo o6lar1w&sig2=sMCcbXXDbFic55cePtylMA&bvm=bv.84607526,d.eXY

[45] ČSN EN 61203. *Syntetické organické estery pro elektrotechnické účely - Návod na úpravu transformátorových esterů v zařízení*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1998. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=26612>

[46] ČSN EN 61099 ed. 2. *Izolační kapaliny - Specifikace nepoužitých syntetických organických esterů pro elektrotechnické účely*. 2. vyd. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2011. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=88293>

[47] IEEE Std C57.147-2008. *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers*. IEEE-SA, 2008. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.147-2008.htmlrmy.aspx?k=88293>

[48] ABB. *BIOTEMP: the greener, safer, longer-life transformer oil* [online]. 2015 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/b6e0c46c231194d0c12578f70047ce19.aspx>

[49] M&I MATERIALS LTD. *MIDEL 7131 Synthetic Ester* [online]. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.midel.com/productsmidel/midel-7131>

[50] HÁJEK, Jan. *Diagnostický systém pro studium aplikovatelnosti alternativních izolačních kapalin*. Plzeň, 2013. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/7455/Jan_Hajek_DP.pdf?sequence=1. Diplomová práce.

[51] M&I MATERIALS LTD. *MIDEL EN Natural Ester* [online]. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.midel.com/productsmidel/midel-en>

[52] ČSN EN 60247. *Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ($\tan \delta$) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2005. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=71962>

[53] ČSN IEC 250. *Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1998. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=50598>

[54] ČSN EN 60156. *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1998. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=41994>

[55] NOVOTNÁ, Kateřina. *Chemické složení a vlastnosti olivového oleje*. Zlín, 2009. Dostupné z: https://dSPACE.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/9084/novotna%20C3%A1_2009_bp.pdf?sequence=1.

Bakalářská. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Hrabě,

Ph.D.

[56] *Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005)*. IEEE, 2005, vol. 16, issue 6. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1496071>

[57] ČSN EN 62325. *Izolační kapaliny - Zkušební metoda pro stanovení potenciálně korozivní síry v použitém a nepoužitém izolačním oleji*. Český metrologický institut: Český metrologický institut, 2009. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=84043>

[58] TRNKA, P., V. MENTLIK a J. CERNÝ. Electroinsulating fluids — New insulating mixtures. *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE, 2011, s. 575-578. DOI: 10.1109/CEIDP.2011.6232722. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6232722>

[59] TRNKA, Pavel, Vaclav MENTLIK a Michal SVOBODA. Ecologically acceptable insulating liquids for electrical appliances. *2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. IEEE, 2014, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICDL.2014.6893121. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6893121>

[60] SVOBODA, Michal, Pavel TRNKA a Michal SVOBODA. Alternative electrical insulating fluids in power transformers. *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE, 2014, s. 399-402. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839419. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6839419>

[61] POMPILI, M., C. MAZZETTI a R. BARTNIKAS. Comparative PD pulse burst characteristics of transformer type natural and synthetic ester fluids and mineral oils. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009, vol. 16, issue 6, s. 1511-1518. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5361569. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5361569>

[62] CAVALLINI, A., C. G. AZCARRAGA a R. BARTNIKAS. Comparison of partial discharge inception voltages for ester and mineral oils under divergent fields. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE, 2013, vol. 16, issue 6, s. 1254-1257. DOI: 10.1109/CEIDP.2013.6748157. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6748157>

[63] NOVOTNÝ, Radovan. Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti. *Elektrorevue*. 2002, č. 17. ISSN 1213-1539

[64] KOTLAN, J. Teoretická elektrotechnika 1: Přednášky z předmětu YTE1, FEL – ZČU, kat. teoretické elektrotechniky. 2010

[65] Katedra fyziky: Fyzikální praktikum. FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD. *Fakulta aplikovaných věd: Katedra fyziky* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP1/tabulky.pdf>

[66] EKO - RAJ. *BP Visco 7000 0W-40, 4L, motorový syntetický olej* [online]. 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.eko-raj.cz/eshop/cs/1029--4032973074043.html>

[67] MOTOSTAR. *Plněsyntetický motocyklový olej pro čtyřtátní motory REPSOL Moto Racing 4T 10W50, 4L* [online]. 2015 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.motostar.cz/cz/eshop/5318-repsol-moto-racing-4t-10w50-4l/>

Příloha 1 Rafinace ropy

Ropa je fosilním palivem, vzniklé z přirozeně se rozkládajících se rostlin a živočichů. Surová ropa je výchozí látkou pro výrobu různých produktů. Ropa obsahuje uhlovodíky. Uhlovodíky jsou v surové ropě děleny do několika tříd – parafíny, aromáty, cykloalkany a alkeny.

Existuje několik možných způsobů zpracování ropy. Mezi nejstarší a nejpoužívanější patří frakční destilace ropy. Novější technikou je chemická výroba (proces zvaný konverze).

Před zpracováním je ropa po transportu do rafinérie odsolována praním upravenou vodou, poté je prováděna kontinuální rektifikace. Základem zpracování ropy je frakční destilace. Během frakční destilace jsou za atmosférického tlaku odděleny jednotlivé skupiny uhlovodíků podle jejich bodů varu. Postup frakční destilace je následující:

- 1) směs dvou nebo více látek se musí zahřát (tyto látky mají rozdílné teploty varu)
- 2) směs se vaří (teplota 1112 °C) a vytváří se plynné látky
- 3) plynné látky se nacházejí ve spodní části frakční destilační kolony. Pára stoupá od spodní části kolony nahoru. Tím dochází k ochlazení páry.
- 4) poté následuje kondenzace za vzniku kapaliny (teplota kolony se rovná teplotě varu látky). Takto vzniklá tekutina přechází do kondenzátoru, poté do skladovacích nádrží nebo následuje další chemické zpracování.

Chemické zpracování probíhá třemi způsoby. První je na principu rozbití velkých uhlovodíků na menší kusy (krakování). Další metodou je sjednocování malých uhlovodíků s většími. Třetí způsob je přeskupování jednotlivých uhlovodíků.

Krakování má několik typů trhlin – tepelné a katalytické. Tepelné trhliny vzniknou tak, že se začnou za vysokých teplot uhlovodíky rozpadat. Teplota 1500 °C je použita k přerušení molekul etanu, butanu a nafty na etylen a benzen. Zbytek je použit na výrobu chemikálií – dehet a koks. Katalyzátory v katalytické reakci jsou důležité proto, že urychlují rozpad uhlovodíků. Katalyzátorem je zeolit, hliník, bauxit, křemík a další. Fluidním katalytickým krakováním vzniká motorová nafta a benzín. Kromě fluidní katalytické reakce existuje i tzv. hydrokrakování.

Sjednocovací proces je použit tehdy, když je nutné spojit menší uhlovodíky ve větší celek. Hlavním procesem sjednocení je katalytické reformování a v něm je použit katalyzátor (platina a její směs). Vedlejším produktem této reakce je plynný vodík.

Alkylace je míchání nízkomolekulárních sloučenin (propylen, butylen) s katalyzátorem (kyselina sírová). Vznikají tak uhlovodíky s vysokým oktanovým číslem, které jsou následně použité v benzínových směsích.

Následuje frakce k odstranění nečistot, jako jsou organické sloučeniny, které obsahují síru, dusík, kyslík, vodu a jiné. Proces je veden přes sloupec kyseliny sírové (odstranění nenasycených uhlovodíků), dále je veden přes absorpční kolonu naplněnou sušícími činidly (odstranění vody). Síra a vodík je odstraněn přes sulfidovou pračku. Po této frakci se vyrábějí jednotlivé produkty (topný olej, benzín, petrolej a další).

Výsledná kvalita minerálního oleje je závislá na geografickém umístění naleziště ropy [11, 21, 41].

Příloha 2 Teploty z meteorologických stanic

Teploty z meteorologických stanic v Plzeňském a Karlovarském kraji [28]:

Tabulka 13 Nejnižší teploty meteorologické stanice Plzeň - Líně

	leden	únor	březen	prosinec
2003	- 13	- 16	- 2	- 13
2004	- 19	- 6	- 4	- 12
2005	- 10	- 13	- 16	- 12
2006	- 17	- 14	- 8	- 8
2007	- 9	- 5	- 3	- 9
2008	- 6	- 12	- 7	- 9
2009	- 4	- 9	- 3	- 19
2010	- 18	- 9	- 12	- 18
2011	- 16	- 14	- 9	- 5
2012	- 8	- 22	- 4	- 12
2013	- 10	- 10	- 9	- 7

Tabulka 14 Nejnižší teploty meteorologické stanice Cheb

	leden	únor	březen	prosinec
2000	-17	-8	-3	-12
2001	-11	-13	-6	-13
2002	-22	-5	-5	-9
2003	-15	-15	-6	-14
2004	-20	-10	-8	-12
2005	-12	-13	-17	-10
2006	-16	-14	-12	-6
2007	-11	-2	-4	-10
2008	-7	-10	-7	-10
2009	-18	-10	-5	-18
2010	-20	-11	-14	-22
2011	-13	-16	-8	-5
2012	-12	-22	-5	-11
2013	-12	-12	-14	-7

Tabulka 15 Nejnižší teploty meteorologické stanice Přimda

	leden	únor	březen	prosinec
2000	-14	-7	-6	-14
2001	-11	-12	-6	-16
2002	-15	-8	-6	-12
2003	-15	-13	-8	-11
2004	-13	-9	-12	-10
2005	-13	-14	-15	-12
2006	-18	-11	-11	-6
2007	-10	-3	-3	-10
2008	-8	-10	-8	-11
2009	-15	-11	-7	-19
2010	-16	-12	-12	-14
2011	-10	-15	-8	-6
2012	-11	-19	-5	-11
2013	-11	-10	-11	-6

Tabulka 16 Nejnižší teploty meteorologické stanice Karlovy Vary

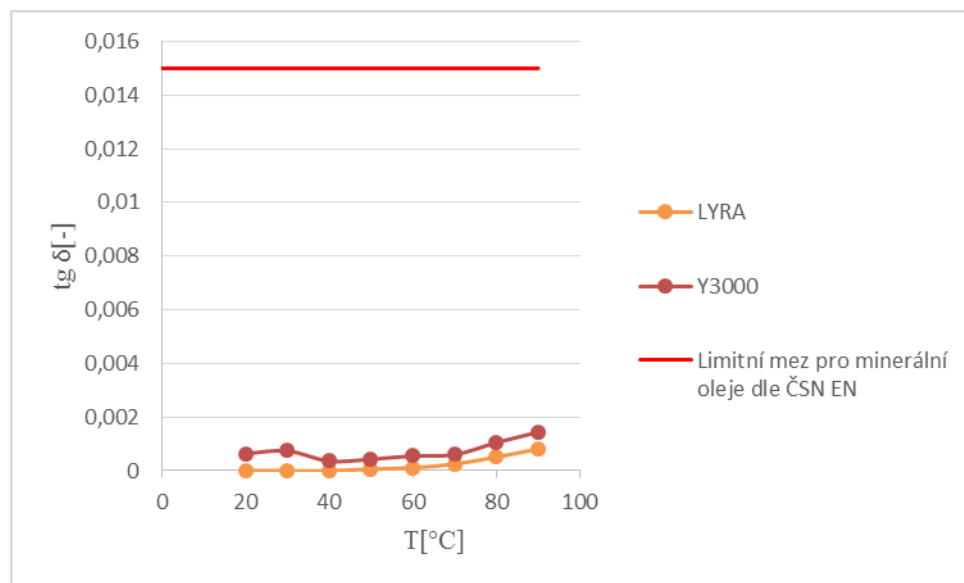
	leden	únor	březen	prosinec
2000	-18	-10	-5	-14
2001	-12	-17	-8	-18
2002	-18	-11	-7	-13
2003	-15	-14	-9	-14
2004	-17	-10	-13	-11
2005	-14	-15	-17	-12
2006	-18	-13	-13	-8
2007	-13	-5	-4	-10
2008	-7	-12	-9	-12
2009	-16	-12	-5	-19
2010	-19	-12	-13	-19
2011	-13	-17	-10	-7
2012	-11	-23	-7	-15
2013	-14	-13	-15	-7

Příloha 3 Naměřené hodnoty ztrátového činitele

Minerální olej

Tabulka 17 Ztrátový činitel

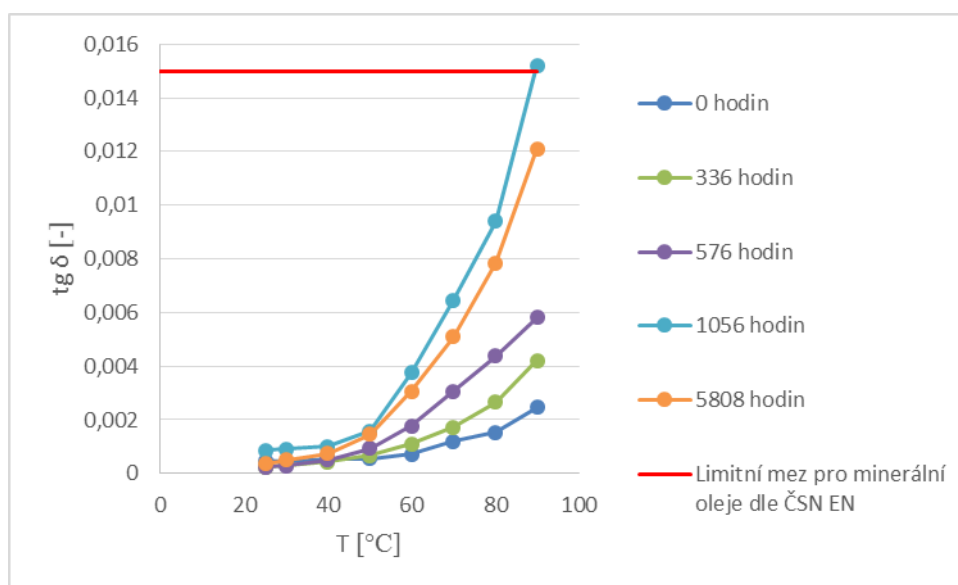
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
LYRA	0,00000 1	0,00000 1	0,00000 1	0,00006	0,00011	0,00025	0,00051	0,00081
Y3000	0,00064	0,00074	0,00036	0,00043	0,00055	0,0006	0,00105	0,00144



Obrázek 15 Ztrátový činitel LYRA, Y3000

Tabulka 18 Ztrátový činitel SHELL s teplotní expozicí

	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
0 hodin	0,00049	0,00042	0,00054	0,00055	0,00073	0,0012	0,00154	0,00246
336 hodin	0,00025	0,00032	0,00044	0,00068	0,0011	0,00172	0,00265	0,0042
576 hodin	0,00025	0,0003	0,0005	0,00094	0,00178	0,00305	0,00438	0,0058
1056 hodin	0,00085	0,00092	0,001	0,00158	0,00375	0,00645	0,00941	0,0152
5808 hodin	0,00035	0,0005	0,00075	0,00145	0,00305	0,0051	0,00785	0,0121

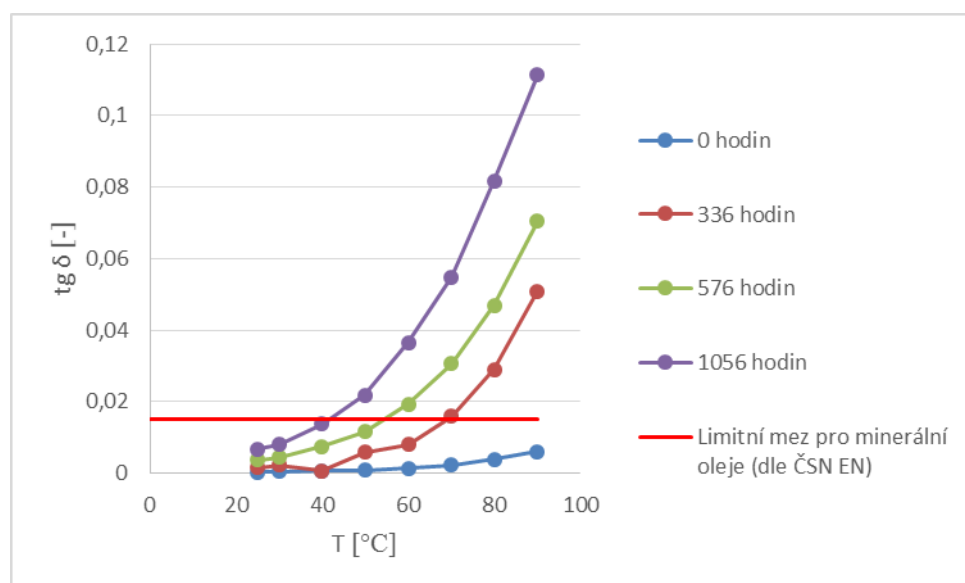


Obrázek 16 Ztrátový činitel SHELL

Syntetický olej

Tabulka 19 Ztrátový činitel MDEL 7131

	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
0 hodin	0,00036	0,00046	0,00067	0,00076	0,00144	0,00225	0,00389	0,00597
336 hodin	0,0015	0,0023	0,00067	0,0059	0,00795	0,01595	0,02905	0,0508
576 hodin	0,003675	0,00435	0,00743	0,0116	0,01938	0,03052	0,04685	0,07045
1056 hodin	0,0068	0,0081	0,0138	0,02175	0,03655	0,0549	0,0818	0,11135

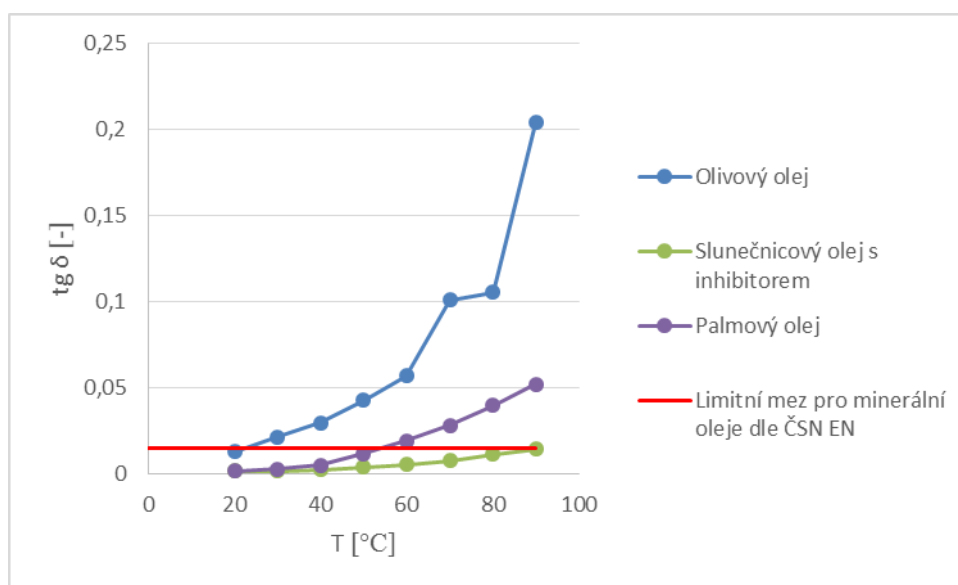


Obrázek 17 Ztrátový činitel MDEL 7131

Rostlinný olej

Tabulka 20 Ztrátový činitel rostlinných olejů

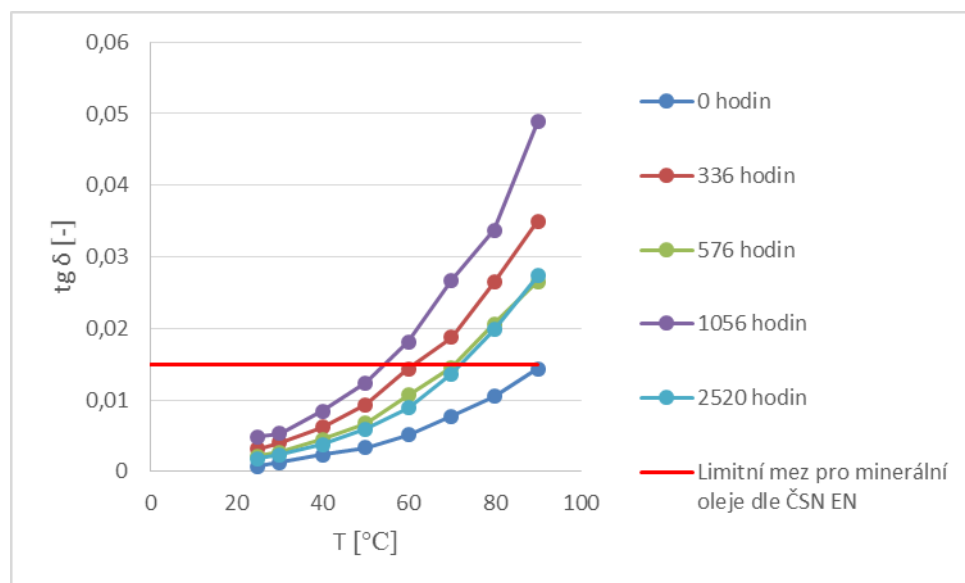
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Sluneč. olej s inhib.	0,0014	0,0015	0,0023	0,0036	0,0053	0,0075	0,0111	0,0142 3
Olivový o.	0,0125	0,0210 5	0,0293	0,0425 6	0,0566 8	0,1007 8	0,1054 5	0,2037 9
Palmový o.	0,0015	0,0024 6	0,0049 1	0,0115 1	0,0190 2	0,0279 8	0,0394 1	0,0517 7



Obrázek 18 Ztrátový činitel pro rostlinné oleje

Tabulka 21 Ztrátový činitel řepkového oleje s inhibítorem

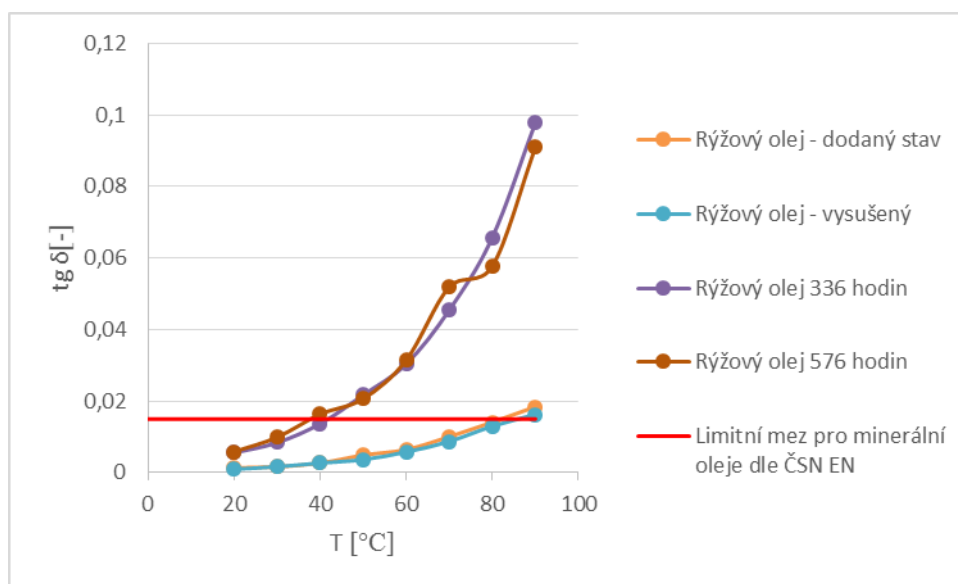
	25 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
0 hodin	0,00071	0,00128	0,00235	0,00334	0,00513	0,00769	0,01053	0,01437
336 hodin	0,00315	0,00405	0,0062	0,00936	0,01437	0,01875	0,02645	0,03501
576 hodin	0,0022	0,00272	0,00448	0,00673	0,01065	0,01455	0,02065	0,02659
1056 hodin	0,00485	0,0053	0,0084	0,0124	0,0181	0,0267	0,0337	0,0489
2520 hodin	0,00183	0,00238	0,00381	0,0059	0,0089	0,0136	0,01985	0,02735



Obrázek 19 Ztrátový činitel pro řepkový olej s inhibítorem

Tabulka 22 Ztrátový činitel pro rýžový olej

	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Dodaný stav	0,00133	0,00161	0,00269	0,00488	0,00643	0,01003	0,0141	0,01839
Vysušený olej	0,00095	0,00166	0,00269	0,00363	0,00577	0,0087	0,01298	0,01625
336 hodin	0,00551	0,00838	0,01365	0,02169	0,03036	0,04543	0,06572	0,09781
576 hodin	0,00583	0,00988	0,01633	0,02061	0,03146	0,05192	0,05771	0,09096



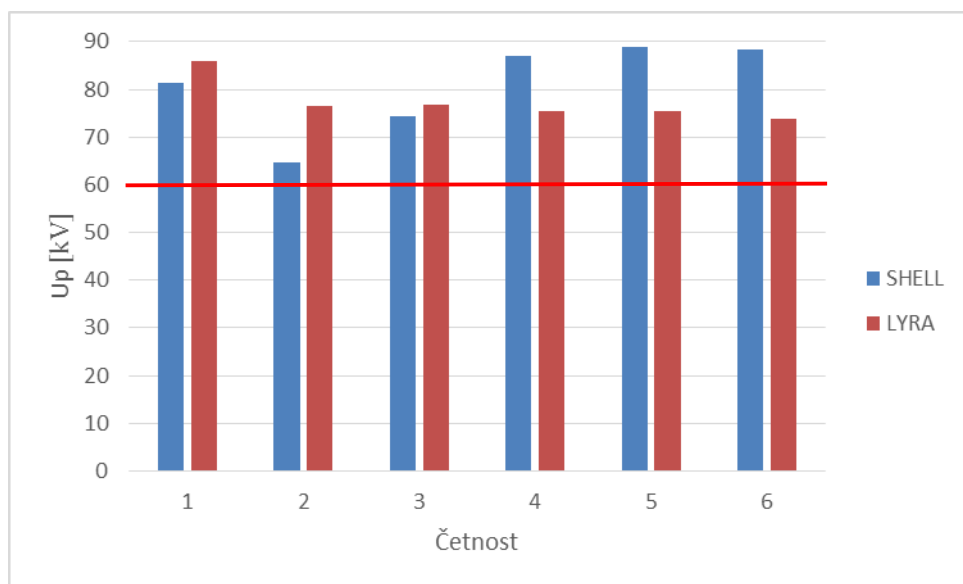
Obrázek 20 Ztrátový činitel pro rýžový olej

Příloha 4 Naměřené hodnoty elektrické pevnosti

Minerální olej

Tabulka 23 Přeskokové napětí

	LYRA	SHELL
U_{P1} [kV]	81,6	81,3
U_{P2} [kV]	63,8	64,8
U_{P3} [kV]	82,0	74,4
U_{P4} [kV]	86,5	87,1
U_{P5} [kV]	87,1	88,9
U_{P6} [kV]	83,2	88,3
Průměr [kV]	80,7	80,8
SMODCH [kV]	8,59	9,58
Var. koef.	0,1064	0,1185

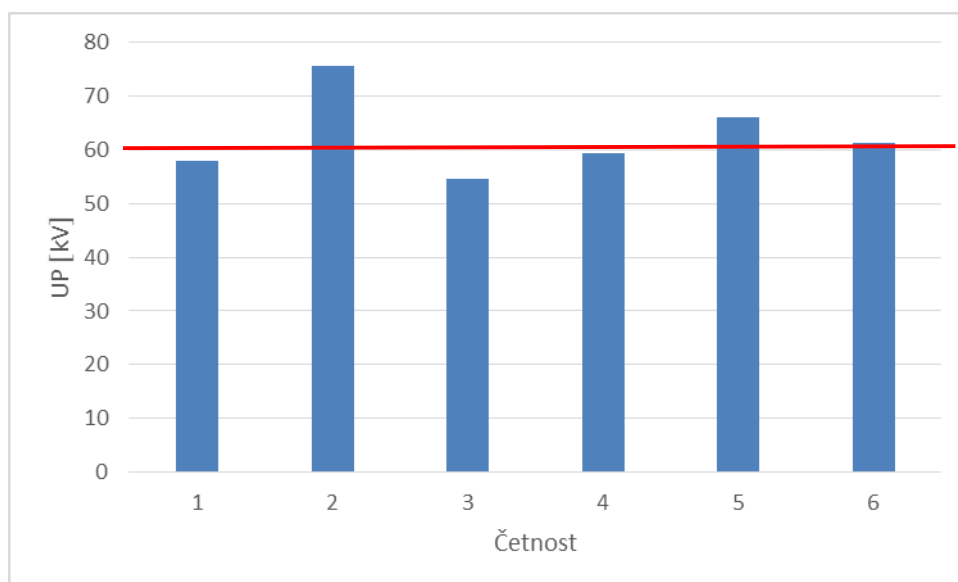


Obrázek 21 Přeskokové napětí - SHELL, LYRA

Syntetický olej

Tabulka 24 Přeskokové napětí - MIDEL 7131

	MIDEL 7131
U_{P1} [kV]	57,95
U_{P2} [kV]	75,75
U_{P3} [kV]	54,57
U_{P4} [kV]	59,29
U_{P5} [kV]	66,16
U_{P6} [kV]	61,35
Průměr [kV]	62,51
SMODCH [kV]	7,54
Var. koef.	0,1259

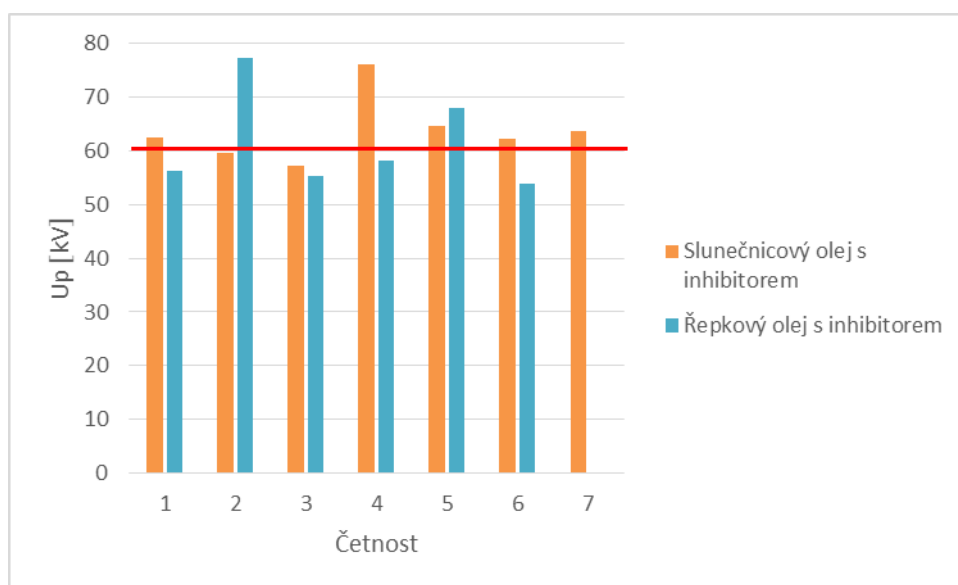


Obrázek 22 Přeskokové napětí MIDEL 7131

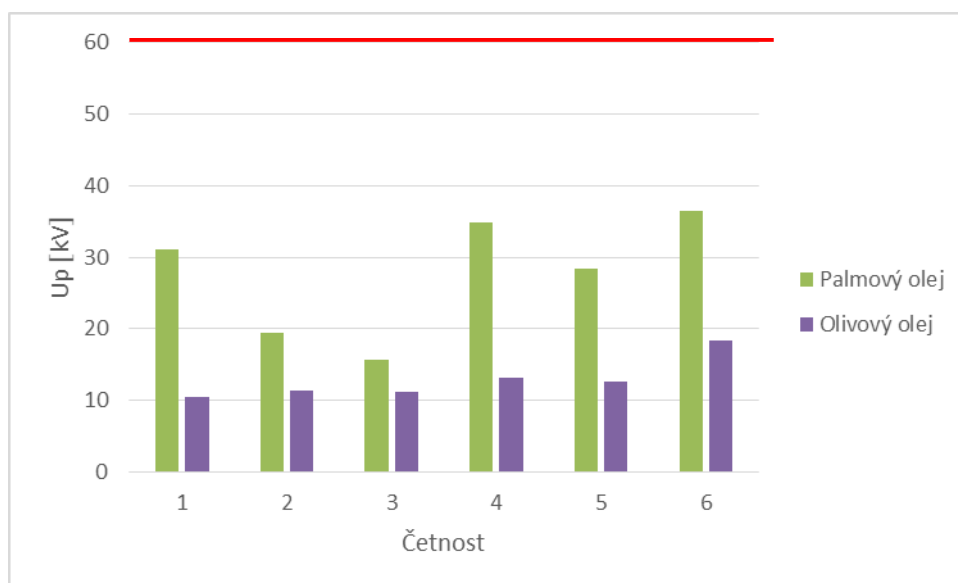
Rostlinný olej

Tabulka 25 Přeskokové napětí rostlinných olejů

	Slunečnicový olej s inhib.	Řepkový olej s inhib.	Olivový olej	Palmový olej
U_{P1} [kV]	62,6	56,26	10,5	31,17
U_{P2} [kV]	59,55	77,28	11,43	19,53
U_{P3} [kV]	57,26	55,41	11,19	15,7
U_{P4} [kV]	76,23	58,23	13,26	34,94
U_{P5} [kV]	64,64	68,11	12,63	28,48
U_{P6} [kV]	62,22	53,96	18,43	36,44
Průměr [kV]	63,75	61,54	12,91	27,71
SMODCH [kV]	6,63	9,22	2,89	8,40
Var. koef.	0,1040	0,1498	0,2236	0,3030



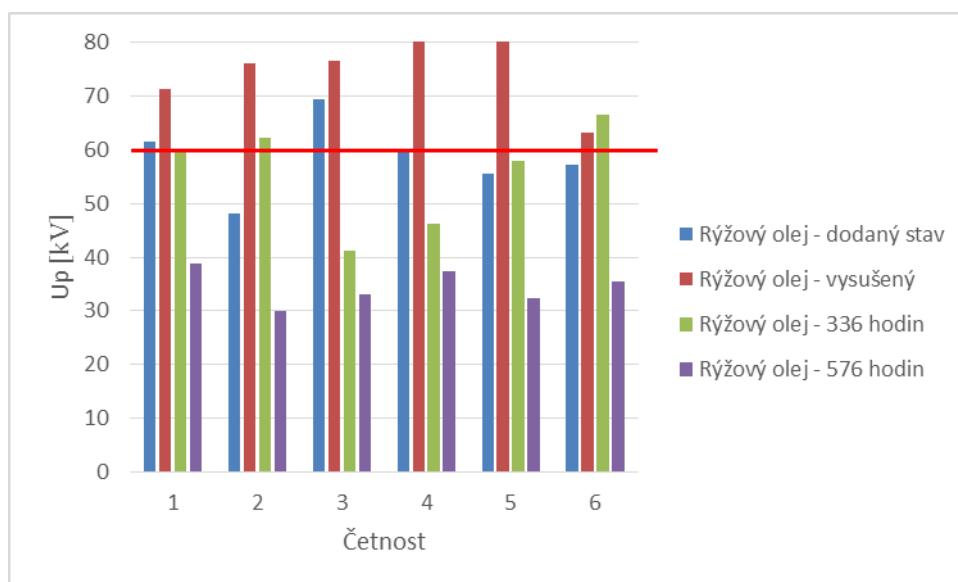
Obrázek 23 Přeskokové napětí - slunečnicový olej s inhib., řepkový olej s inhib.



Obrázek 24 Přeskokové napětí - olivový olej, palmový olej

Tabulka 26 Přeskokové napětí rýžového oleje

	Dodaný stav	Vysušený o.	336 hodin	576 hodin
U_{P1} [kV]	61,47	71,46	59,52	38,76
U_{P2} [kV]	48,15	76,05	62,17	30,05
U_{P3} [kV]	69,36	76,51	41,31	33,21
U_{P4} [kV]	59,91	81,79	46,25	37,3
U_{P5} [kV]	55,49	84,93	57,85	32,36
U_{P6} [kV]	57,30	63,11	66,61	35,43
Průměr [kV]	58,61	75,64	55,52	34,52
SMODCH [kV]	7,02	7,74	9,76	3,25
Var. koef.	0,1197	0,1023	0,1755	0,0942

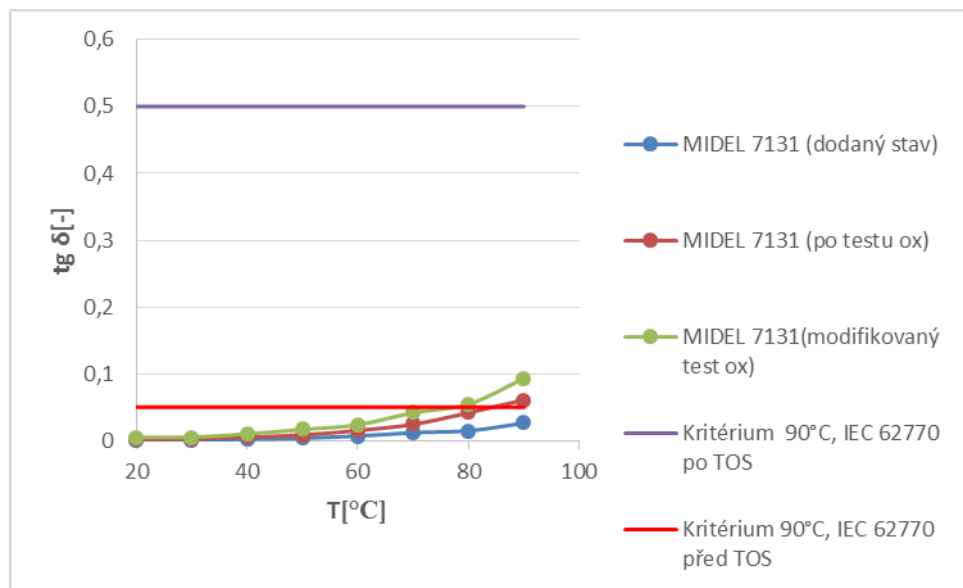


Obrázek 25 Přeskokové napětí – rýžový olej

Příloha 5 Oxidační stabilita

Tabulka 27 Oxidační stabilita - MIDEL 7131

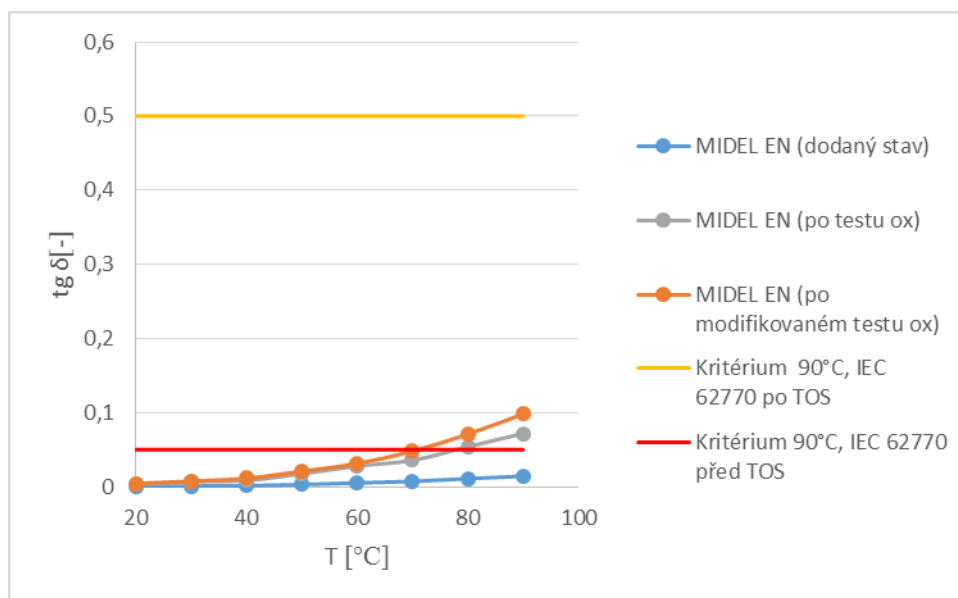
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Dodaný stav	0,00072	0,00106	0,00201	0,00354	0,00669	0,012	0,01463	0,02635
Po testu ox	0,00151	0,00277	0,00521	0,00843	0,01516	0,02434	0,04171	0,06083
Po modifik. testu ox	0,00506	0,00511	0,00999	0,01673	0,02367	0,04171	0,05449	0,09311



Obrázek 26 Oxidační stabilita - MIDEL 7131

Tabulka 28 Oxidační stabilita - MIDELE EN

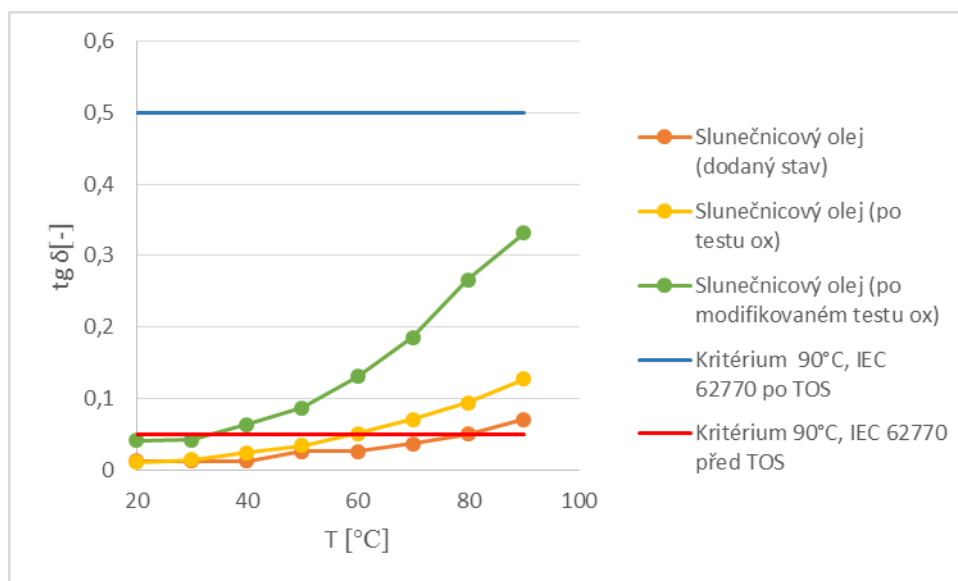
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Dodaný stav	0,00076	0,00103	0,00164	0,00303	0,00542	0,00737	0,01115	0,01436
Po testu ox	0,00325	0,00689	0,00863	0,01763	0,02808	0,0358	0,05411	0,07194
Po modifik. testu ox	0,00441	0,00764	0,0115	0,0211	0,03146	0,04814	0,071	0,09827



Obrázek 27 Oxidační stabilita - MIDELE EN

Tabulka 29 Oxidační stabilita – Slunečnicový olej (bez inhibitoru)

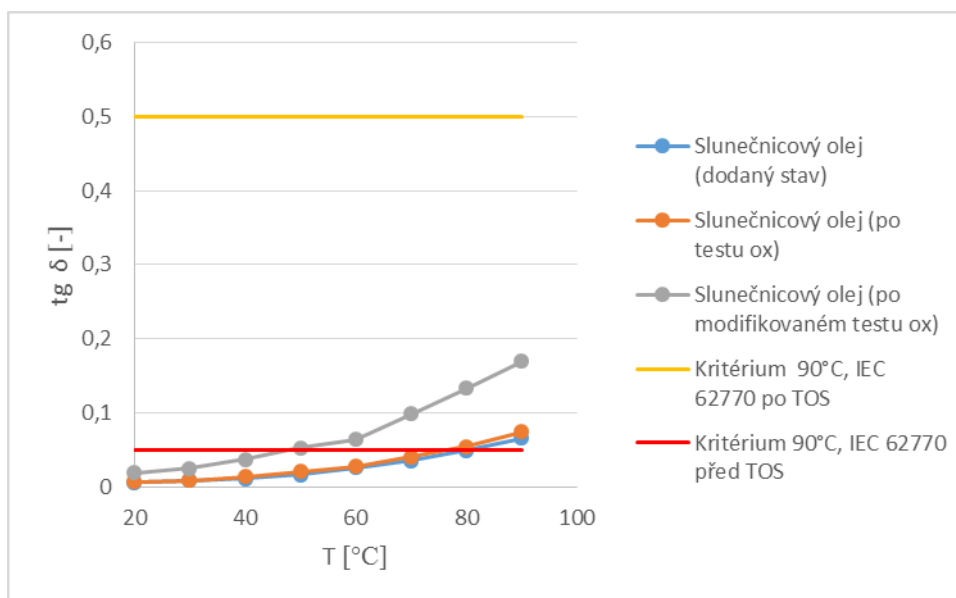
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Dodaný stav	0,01226	0,01226	0,01226	0,02574	0,02574	0,03637	0,04986	0,07059
Po testu ox	0,01051	0,01447	0,02383	0,03391	0,0512	0,07063	0,09362	0,1266
Po modifik. testu ox	0,04056	0,04176	0,06316	0,08655	0,13027	0,1857	0,26639	0,33156



Obrázek 28 Oxidační stabilita - slunečnicový olej (bez inhibitoru)

Tabulka 30 Oxidační stabilita - Slunečnicový olej (s inhibátorem)

	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Dodaný stav	0,00639	0,00875	0,01162	0,01696	0,02654	0,03536	0,04945	0,06554
Po testu ox	0,00689	0,00849	0,01433	0,02119	0,02816	0,04063	0,0544	0,07494
Po modifik. testu ox	0,01925	0,02571	0,03738	0,05332	0,06446	,09876	0,13338	0,16982



Obrázek 29 Oxidační stabilita - slunečnicový olej (s inhibátorem)