

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Možnosti ověření vlastností izolačních kapalin**

**autor: Bc. Jan Turek**  
**vedoucí práce: Ing. Pavel Prosr, Ph.D.**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan TUREK**  
Osobní číslo: **E10N0063P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Možnosti ověření vlastností izolačních kapalin**  
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. Provedte dělení kapalin s ohledem na možnosti použití v elektrotechnice.
2. Definujte základní degradační parametry izolačních kapalin.
3. Uveďte soubor diagnostických metod pro hodnocení stavu izolačních kapalin.
4. Provedte porovnání vybraných vlastností zástupců z různých skupin izolačních kapalin.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
2. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. Praha : Technická literatura BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
3. Internetové informační zdroje ? databáze ScienceDirect, IEEE

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Pavel Prosr, Ph.D.**

Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá problematikou kapalných izolantů používaných v elektrotechnice jako izolační a chladicí médium. V úvodu práce je provedeno dělení kapalin dle jejich původu, popis běžně používaných zástupců z každé skupiny a jejich vzájemné srovnání. V dalších částech jsou rozebrány základní degradační parametry izolačních kapalin a dále metody určené k posouzení aktuálního stavu elektrických, fyzikálních a chemických parametrů. Praktická část je zaměřena na laboratorní měření a vzájemné porovnání vybraných vlastností u předložených vzorků oleje. Výsledkem experimentu je životnost měřeného oleje vyjádřená životnostní křivkou.

## **Klíčová slova**

Elektroizolační kapaliny, minerální olej, syntetický olej, rostlinný olej, diagnostika elektroizolačních kapalin, degradační parametry, životnostní křivka.

## **Abstract - Possibilities of Properties Verification of Insulating Liquids**

This diploma thesis deals with the liquid insulation used in electrical engineering as an insulating and cooling medium. The first part of the thesis is focused on the division of different types of liquids sorted by origin with description of commonly used types and their comparison. In the following sections, there are analyzed basic degrading factors of insulating liquids and methods used to recognition actual quality of electrical, physical and chemical parameters. The practical part is focused on laboratory measurement and comparison of chosen characteristic of submitted oil samples. The result of the measurement is the life time curve of the oil.

### **Key words**

Electroinsulating liquids, mineral oil, synthetic oil, natural oil, diagnosing electroinsulating liquids, degrading factors, lifetime curve.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 10.5.2012

.....

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Pavlovi Prosovi Ph.D. za velké množství rad, připomínek a námětů, díky kterým bylo možno dokončit tuto diplomovou práci. Děkuji také za velkou ochotu a veškerý čas strávený nad řešením problémů spojených s touto prací. Dále bych chtěl poděkovat panu Jaroslavovi Bartoňovi za rady a odbornou asistenci při měření. Poděkování patří také všem, kteří mi pomáhali během studia.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 IZOLAČNÍ KAPALINY</b> .....	<b>11</b>
1.1 MINERÁLNÍ OLEJE .....	12
1.1.1 <i>Regenerace transformátorových olejů</i> .....	13
1.1.2 <i>Charakteristika zástupce skupiny minerálních olejů</i> .....	14
1.2 SYNTETICKÉ OLEJE.....	16
1.2.1 <i>Charakteristika zástupce skupiny syntetických olejů</i> .....	17
1.3 ROSTLINNÉ OLEJE .....	18
1.3.1 <i>Charakteristika zástupce skupiny rostlinných olejů</i> .....	20
1.4 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH ZÁSTUPCŮ .....	21
<b>2 DEGRADAČNÍ PARAMETRY IZOLAČNÍCH KAPALIN</b> .....	<b>23</b>
2.1 PŮSOBENÍ TEPLoty .....	23
2.2 PŮSOBENÍ VLHKOSTI.....	25
2.3 OXIDAČNÍ STÁRNUTÍ .....	25
<b>3 HODNOCENÍ STAVU IZOLAČNÍCH KAPALIN</b> .....	<b>27</b>
3.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH KAPALIN.....	27
3.1.1 <i>Elektrická pevnost</i> .....	27
3.1.2 <i>Vnitřní rezistivita</i> .....	28
3.1.3 <i>Ztrátový činitel</i> .....	29
3.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH KAPALIN .....	30
3.2.1 <i>Hustota</i> .....	30
3.2.2 <i>Viskozita</i> .....	31
3.2.3 <i>Bod vzplanutí a bod tuhnutí</i> .....	32
3.3 CHEMICKÉ VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH KAPALIN .....	32
3.3.1 <i>Obsah vody v oleji</i> .....	33
3.3.2 <i>Číslo kyselosti</i> .....	33
3.4 STRUKTURÁLNÍ METODY PRO HODNOCENÍ STAVU KAPALIN.....	34
3.4.1 <i>Infračervená spektroskopie</i> .....	34



<b>4</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>36</b>
4.1	MĚŘÍCÍ PRACOVNÍ MÍSTO .....	37
4.2	ZPŮSOB MĚŘENÍ .....	38
4.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	38
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>44</b>
	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>49</b>

## Seznam symbolů

$A$	$[\text{s}^{-1}]$	faktor udávající frekvenci střetávajících se molekul
$E$	$[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$	aktivační energie
$R$	$[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}]$	univerzální plynová konstanta
$T$	$[\text{K}]$	absolutní teplota
$E_p$	$[\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}]$	elektrická pevnost
$U_p$	$[\text{kV}]$	průrazné napětí
$d$	$[\text{mm}]$	vzdálenost elektrod
$\rho$	$[\Omega\cdot\text{m}]$	rezistivita
$\gamma$	$[\text{S}\cdot\text{m}^{-1}]$	konduktivita
$\rho_v$	$[\Omega\cdot\text{m}]$	vnitřní rezistivita
$\epsilon_0$	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	permitivita vakua
$C_0$	$[\text{F}]$	kapacita prázdné měřicí nádoby
$R_v$	$[\Omega]$	vnitřní elektrický odpor
$\rho$	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$	hustota
$m$	$[\text{g}]$	hmotnost
$V$	$[\text{cm}^3]$	objem
$\nu$	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
$\eta$	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	dynamická viskozita
$T$	$[\%]$	transmitance
$I$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	intenzita záření prošlá vzorkem
$I_0$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	intenzita záření generovaná zdrojem
$A$	$[-]$	absorbance
$T$	$[\%]$	transmitance
$t$	$[\text{h}]$	čas
$\text{tg } \delta$	$[-]$	ztrátový činitel

## Úvod

Izolační systém je nezbytnou součástí každého elektrického zařízení a jeho funkcí je elektricky oddělit místa s rozdílným potenciálem. Materiály používané jako elektroizolační jsou dle skupenství děleny na pevné kapalně a plynné. Ideální izolant ve své struktuře neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje a má nulovou vodivost. V praxi se ovšem setkáváme s technickými izolanty, které kvůli příměsím a znečištění mají určitou nenulovou elektrickou vodivost.

Předmětem této diplomové práce je popis izolačních kapalin, které se používají v různých oblastech elektrotechniky, například jako součást izolačního systému výkonových transformátorů. Olejová náplň zde vykonává nejen funkci elektroizolační, ale i chladicí, takže nároky kladené na jeho kvalitu jsou značné. Další uplatnění oleje nachází v průchodkách, kondenzátorech, dále jako impregnant a v dřívější době i v kabelech.

Minerální oleje založené na ropné bázi jsou stále nejvíce používanými kapalnými izolanty a to i navzdory současné snaze o jejich nahrazení jinými, ekologicky výhodnějšími oleji. Hlavními důvody ke hledání alternativ jsou hořlavost, nízká biologická odbouratelnost a toxicita minerálních olejů a dále skutečnost, že se zásoby ropy zmenšují. Výzkum je zaměřen na hledání vhodných syntetických či rostlinných izolačních kapalin, jejich většímu nasazení ovšem v současné době brání vyšší cena.

Na oleje působí během jejich provozu v zařízeních různé degradační faktory, které mají za následek zhoršování elektrických, fyzikálních i chemických parametrů oleje. Stárnutí způsobuje hlavně teplota, vlhkost a oxidace, dále pak i elektrické namáhání a přítomnost nečistot či kalů. Abychom mohli posoudit aktuální stav kapaliny respektive míru zestárnutí, lze využít celou řadu fenomenologických či strukturálních diagnostických metod. Základní principy vybraných metod jsou popsány v této práci.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na sestavení životnostní křivky oleje na základě teplotního stárnutí a měření elektrických parametrů. Testování životnosti je z časového hlediska velmi náročné, a proto se používá zrychlených zkoušek, kdy je izolační materiál vystaven vyšší intenzitě namáhání, v tomto případě vyšší teplotě.

## 1 Izolační kapaliny

Izolační kapaliny nacházejí uplatnění v řadě elektrotechnických odvětví. Nejčastěji se s nimi setkáváme v podobě izolačních olejů ve výkonových transformátorech, kde slouží nejen jako izolační médium (společně s pevnými izolanty), ale díky své tepelné vodivosti i jako chladící médium. Vhodné je ovšem použít olej s nízkou viskozitou, jež dobře vyplní daný prostor a odvede vzniklé teplo. Dále se lépe dostane do pórů pevné izolace, kterou elektricky odlehčí a zároveň eliminuje výbojovou činnost. U izolačních kapalin je rovněž nezbytná vysoká časová stálost jednotlivých parametrů, které by se měly vlivem tepla, oxidace či jiných vlivů měnit co nejméně [1, 2].

Dalším možným použitím izolačního oleje je v náplních kondenzátorů, kde slouží jako impregnant papírového dielektrika. Oleje určené k tomuto účelu by měly mít velkou vnitřní rezistivitu, malý rozptyl ztrátového činitele při působení vyšších teplot či dobrou oxidační stabilitu. Podobně se izolační kapaliny využívají u kabelů, kde je opět papírová izolace impregnována olejem. Pro tuto aplikaci jsou vhodné oleje s teplotně závislou viskozitou, kdy je nutná nízká viskozita při plnění a naopak vysoká viskozita při samotném provozu, aby nedocházelo ke stékání (migraci) oleje při uložení konců kabelu v různých výškách. V současné době se tyto kabely již nepokládají, ale vzhledem k tomu, že mají životnost několik desítek let, budeme se s nimi setkávat v provozu ještě dlouhou dobu [2, 3].

Aby mohl být olej součástí dostatečně dimenzovaného izolačního systému a mohl být nasazen do reálného provozu, je třeba znát jeho charakteristické parametry. Důležité jsou rovněž podmínky, ve kterých bude zařízení provozováno. Různé degradační parametry totiž mohou urychlit stárnutí izolačního oleje, a proto je nutné brát je v úvahu při výběru vhodné izolační kapaliny. Oleje tedy musí splňovat řadu různorodých vlastností. Mezi ty elektroizolační se například řadí hodnota elektrické pevnosti, ztrátový činitel, rezistivita. Z fyzikálních vlastností sledujeme například viskozitu, tepelnou vodivost, bod vzplanutí či hustotu. Důležité jsou i chemické vlastnosti, mezi hlavní řadíme toxicitu, biologickou odbouratelnost, termo-oxidační stabilitu, obsah vody v oleji [4].

V elektrotechnice se používají kapalné izolanty trojího typu: minerální, rostlinné a syntetické oleje.

## 1.1 Minerální oleje

Minerální olej se získává destilací z ropy, kdy se ropa dělí na jednotlivé frakce podle bodu varu. Aby se z olejového destilátu odstranily nežádoucí složky, je nutná následná rafinace, při které se tyto nežádoucí sloučeniny změní na látky nerozpustné a posléze se odstraní. Druh a stupeň rafinačního procesu jsou vybírány tak, že výsledný olej má vlastnosti splňující limity pro použití v transformátorech. Ostatní frakce získané destilací ropy se využijí k výrobě jiných produktů, například benzínu. Chemicky jsou minerální oleje směsí různých uhlovodíků, jejichž zastoupení je dáno druhem a kvalitou ropy, protože ropa nalezená na různých místech světa má odlišné složení. Vzhledem k snadné dostupnosti a cenové výhodnosti jsou minerální oleje nejčastěji používaným izolačním médiem současnosti [5, 6].

Největší nevýhodou minerálních olejů je jeho velmi pomalá odbouratelnost a z toho plynoucí dlouhodobá setrvačnost v ekosystému. Během testů [11] se prokázalo, že biologická rozložitelnost, definovaná dle [43] jako pokles koncentrace sledované látky v procentech důsledkem její degradace směsnou bakteriální kulturou po 21 dnech při 25 °C, se pohybuje v rozmezí 15 – 35% a měří se dle testu CEC L-33-A-93. Negativní vliv má jak na flóru a faunu, tak i na lidské zdraví při kontaminaci pitné vody. Olej se do prostředí může dostat různými způsoby, například havárií zařízení, netěsnostmi, při likvidaci či při opravách zařízení.

V současné době je snaha nahrazovat minerální oleje lépe biologicky rozložitelnými oleji – syntetickými a rostlinnými. Problém ovšem tvoří cena těchto alternativ, která je stále několikrát vyšší, a značně tak brání rychlejšímu rozšíření. Jako příklad poslouží orientační srovnání ceny minerálního oleje Shell Diala D, jehož cena za litr je necelých 100 Kč [13], a syntetického oleje Midel 7131, kde se cena za litr pohybuje kolem 330 Kč [12]. Při větším odebíraném množství výrobci často poskytují slevu, ovšem poměr mezi cenami srovnávaných olejů zůstává stejný. Kvůli těmto cenovým rozdílům olejové náplně se ve většině případů přikláníme k levnější variantě, k dražším a ekologičtějším variantám přistupujeme pouze ve výjimečných případech, či pokud si to situace žádá – např. v místě bytové zástavby či v blízkosti vodních zdrojů.

### 1.1.1 Regenerace transformátorových olejů

Největší část spotřeby minerálních olejů představuje nasazení v transformátorech. Množství oleje se významně liší s tím, jaký výkon dokáže transformátor přenést a jak velká je jeho fyzická velikost. Nejmenší olejové transformátory s výkony 25 kVA obsahují kolem 75 litrů, ty největší s výkony 400 MVA mohou obsahovat až 40000 litrů transformátorového oleje [6]. Během provozu ovšem dochází ke zhoršování jeho parametrů, což se děje následkem kombinovaného působení teploty, kyslíku, vody, elektrického pole aj. Pokud vlivem tohoto stárnutí dojde k poklesu sledovaných parametrů až pod určitou kritickou mez, zvyšuje se zde riziko havárie transformátoru. Produkty oxidačních reakcí, jako jsou například kyseliny a kaly, mohou navíc poškodit pevnou izolaci. Aby se zabránilo jakýmkoliv škodám vinou poškození či úplné destrukce, provádějí se preventivní měření na odebraných vzorcích. Dostatečně reprezentativní vzorky zajistíme odběrem za standardních provozních podmínek, a to buďto metodou odběru bez styku oleje s ovzduším nebo za přístupu vzduchu. Intervaly odběrů se liší dle typu zařízení v rozmezí od jednoho roku po šest let. Výsledky měření je následně nutné zařadit do jedné ze tří skupin:

- a) Olej je v normálním stavu a intervaly odběrů není třeba měnit.
- b) U odebraného vzorku se prokáže zhoršení jeho parametrů a je doporučeno zkrátit intervaly odběrů.
- c) Kvalitativní parametry nevyhovují doporučeným hodnotám a situace musí být neodkladně řešena. První možností je vyměnit starou náplň za novou a zestárlý olej následně zlikvidovat. Druhým možným řešením je olej s nevyhovujícími parametry regenerovat [7, 8, 9].

Regenerace transformátorového oleje je komplexní proces, jehož výsledkem je znovuoobnovení všech parametrů použitého oleje na hodnoty stejné nebo podobné hodnotám nového oleje. Při tomto procesu dochází k filtraci pevných částic, odplynění, vysoušení a k následné inhibici oleje. Současně s regenerací oleje dochází k vyčištění vinutí a transformátorové nádoby, kde se nacházejí kaly, různé sedimenty a jiné zbytky po termo-oxidačním stárnutí oleje. Během regeneračního procesu dochází k velmi nízké produkci odpadních látek a většinou není nutno olej doplňovat [10].

V následující orientační tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny typické a limitní hodnoty některých parametrů pro transformátorové oleje.

**Tab. 1** – Typické parametry transformátorových olejů [7]

Parametr	Jednotky	Metoda	Zestárlý olej	Nový olej	Regener. olej	Limity dané normami
Průrazné napětí	kV.(2,5 mm) <sup>-1</sup>	IEC 60156	~ 20	> 70	> 70	50
Číslo kyselosti	(mg KOH).g <sup>-1</sup>	IEC 62021-1	~ 0,2	< 0,03	< 0,01	0,01
Obsah vody	mg.kg <sup>-1</sup>	IEC 60814	až 1500	< 10	< 10	10
Ztrát. činitel při 90 °C	-	IEC 60247	~ 0,1	< 0,003	< 0,004	0,005
Mezipovrch. napětí	mN.m <sup>-1</sup>	ISO 606295	~ 25	> 40	> 50	40
Rezistivita při 90 °C	GΩm	IEC 60247	~ 1	> 150	> 150	60
Obsah inhibitoru	%	IEC 60666	~ 0	0,3 – 0,5	0,3 – 0,5	-

Z uvedené tabulky je patrné, že regenerovaný olej má srovnatelné parametry jako olej nový, v některých případech dokonce lepší. Všude tam, kde je to možné, je tedy z ekologického i ekonomického hlediska výhodnější zestárlou náplň transformátoru zregenerovat, než ji nechat kompletně vyměnit za novou.

### 1.1.2 Charakteristika zástupce skupiny minerálních olejů

Běžně používaným elektroizolačním olejem na ropné bázi je Shell Diala D [36]. Je neinhibovaný a vyrábí se ze speciálního naftenického oleje, který se připravuje zvláštními rafinačními procesy. Splňuje veškeré nároky kladené na oleje tohoto typu v oblastech elektroizolačních vlastností, tepelného chování, bodu tuhnutí, oxidační stability, životnosti atd. Své uplatnění nalézá ve všech typech průmyslových i vysokonapěťových transformátorech, dále v usměrňovačích, spínačích aj. [14].

Cílem studií [15, 16], které se zabývaly měřením oleje Shell Diala D, bylo ověřit některé výrobcem udávané hodnoty zobrazené v Tab. 2 a rovněž zjistit

chování oleje při působení různých provozních faktorů, kterým je olej v běžném provozu vystaven.

Bylo například zjištěno, že při vystavení oleje pulznímu namáhání s odstupem elektrod 2 mm docházelo k elektrickým přeskokům kolem hodnoty  $154,7 \pm 16,4$  kV. Při namáhání střídavým napětím o frekvenci 50 Hz s 2 mm odstupem elektrod hrot-koule se přeskoky pohybovaly kolem hodnoty  $30,4 \pm 3,4$  kV během prvního měření a během druhém měření kolem hodnoty  $35,1 \pm 6,1$  kV [15]. V jiných testech [16] byl olej podroben například měřením ztrátového činitele v závislosti na teplotě. Při počáteční hodnotě  $25\text{ °C}$  byl naměřen ztrátový činitel 0,0008 a při  $90\text{ °C}$  jeho hodnota stoupla na 0,004; s rostoucí teplotou tedy rostl ztrátový činitel, což koresponduje s teoretickými předpoklady v [26]. Naopak závislost rezistivity na teplotě má klesající charakter, při  $25\text{ °C}$  byla rezistivita  $2 \cdot 10^{12}\ \Omega \cdot \text{m}$ , při  $90\text{ °C}$  rezistivita klesla na  $1 \cdot 10^{11}\ \Omega \cdot \text{m}$ .

**Tab. 2** – Vybrané vlastnosti oleje Shell Diala D udávané výrobcem [14]

Vlastnost	Jednotka	Metoda	Hodnota
<b>Hustota</b> při $20\text{ °C}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ISO 3675	881
<b>Viskozita</b> při $20\text{ °C}$ při $-30\text{ °C}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	ISO 3104	17,3 730
<b>Viskozita</b> při $-30\text{ °C}$	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	ISO 3104	730
<b>Bod vzplanutí</b>	$\text{°C}$	ISO 2719	138
<b>Bod tuhnutí</b>	$\text{°C}$	ISO 3016	-60
<b>Průrazné napětí</b> s úpravou	$\text{kV} \cdot (\text{2,5 mm})^{-1}$	IEC 60156	>70
<b>Ztrátový činitel</b> při $90\text{ °C}$	-	IEC 60247	0,001
<b>Oxidační stabilita</b> Celková kyselost Kaly	$(\text{mg KOH}) \cdot \text{g}^{-1}$ % hm.	IEC 61125 C	0,23 0,1



## 1.2 Syntetické oleje

Výzkum v oblasti olejem plněných transformátorů v současné době směřuje k hledání alternativ k minerálním olejům. Jak již bylo zmíněno, hlavní příčinou jsou především environmentální a bezpečnostní důvody. Jelikož syntetické kapaliny jsou všeobecně snadněji odbouratelné, mají vyšší odolnost proti hoření a lépe odolávají stárnutí, jeví se jako vhodná náhrada za oleje minerální. Nebýt jejich vysoké ceny, rozšíření těchto olejů by bylo mnohem rychlejší. Použití se proto zužuje především na aplikace, kde je vyžadována zvýšená bezpečnost (speciální transformátory, spínače). Další využití nalézají jako impregnant papírových izolací nebo při míchání s minerálním olejem, zde ovšem musí být zaručena mísitelnost obou komponent v jakémkoliv poměru [17].

Syntetické oleje se dle výroby a složení dělí do následujících skupin [1]:

- *kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků*
- *chlorované uhlovodíky*
- *fluorované sloučeniny*
- *organické estery*
- *silikonové kapaliny.*

Kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků se označují jako polybutyleny. Jsou to ekologicky nezávadné, nepolární látky s odolností proti oxidaci a záření. Jsou stabilní i při vyšších teplotách. Použití nachází především jako impregnace svitkových kondenzátorů a náplně kabelů.

Chlorované uhlovodíky představují deriváty benzenu a bifenyly. Dle stupně chlorování se mění elektroizolační vlastnosti. Dříve se těchto kapalin využívalo například pro napouštění papírové izolace, v současné době je ovšem jejich použití zakázáno kvůli ekologické závadnosti a zdraví škodlivým účinkům.

Další skupinou jsou fluorované sloučeniny. Mezi hlavní přednosti patří elektroizolační vlastnosti, naopak problémem je toxicita fluoru. Chemická stálost je na vysoké úrovni do teploty 500 °C, nad tuto úroveň dochází ke snadnému vypařování. Za přítomnosti vlhkosti nebo elektrického výboje vznikají kyseliny obsahující fluor, které jsou velmi agresivní na izolační systém a některé kovy. S jejich aplikací se můžeme setkat v transformátorech a výkonových spínačích, kde je využíváno jejich zhášecích účinků.

Organické estery se vyznačují vysokým bodem hoření a vzplanutí, ale i větší viskozitou v porovnání s minerálními oleji. Používají se pro plnění vysokofrekvenčních kondenzátorů a transformátorů, kde se ovšem vyšší viskozita projeví ve zhoršeném přestupu tepla a zvýšených nákladech na provoz oběhových čerpadel.

Poslední skupinou jsou silikonové kapaliny. Předností těchto kapalin je ekologická nezávadnost, nehořlavost, tepelná stálost v širokém rozsahu teplot a elektroizolační vlastnosti na vysoké úrovni. Oproti minerálním olejům mají nízký bod tuhnutí a nepodléhají oxidaci či jiným chemickým procesům [1, 4].

### 1.2.1 Charakteristika zástupce skupiny syntetických olejů

V praxi se lze často setkat se syntetickým olejem MIDEL 7131. Jeho srovnání s běžně používaným minerálním olejem Shell Diala je provedeno například v [15]. Jeho bázi tvoří organické estery. Kvůli vyšší viskozitě než běžné minerální oleje (Tab. 2 a Tab. 3) má mírně zhoršené chladicí schopnosti, které ovšem stále s rezervou odpovídají požadavkům stanovených v normách. Mezi ty nejdůležitější přednosti oleje patří dobrá odolnost proti oxidaci, schopnost absorbovat větší množství vlhkosti než minerální oleje bez zhoršení jeho izolačních vlastností, vysoký bod vzplanutí. Pokud je olej provozován při běžných teplotách v hermeticky uzavřených nádobách transformátorů, nedochází během životnosti transformátoru ke zhoršení jeho parametrů nad povolenou mez a je tedy nepravděpodobné, že by olej vyžadoval údržbu. Další výhodou je jeho netoxičita, není karcinogenní ani jinak zdraví škodlivý. Biologická rozložitelnost dle testu CEC L-33-A-93 je na úrovni 99 % [19].

Během výzkumné činnosti na univerzitě Strathclyde byl MIDEL 7131 podroben stejným zkouškám [15], jako minerální olej Shell Diala D. Vyplývá z nich, že impulzní napětí způsobí přeskok kolem hodnoty  $142,0 \pm 2,0$  kV (odstup elektrod 2 mm). Namáhání střídavým 50 Hz napětím s 2 mm odstupem elektrod hrot-koule způsobilo během tří sérií pokusů přeskoky s hodnotami  $35,1 \pm 3,1$  kV,  $39,4 \pm 3,8$  kV a  $36,6 \pm 3,2$  kV. Z porovnání přeskokových napětí olejů MIDEL 7131 a Shell Diala D lze usoudit, že v tomto ohledu mezi nimi nejsou žádné výrazné rozdíly.

Následující tabulka (Tab. 3) zobrazuje vybrané výrobcem udávané vlastnosti oleje MIDEL 7131.

**Tab. 3** - Vybrané vlastnosti oleje MIDEL 7131 udávané výrobcem [18]

Vlastnost	Jednotka	Metoda	Hodnota
<b>Hustota</b> při 20 °C	kg.m <sup>-3</sup>	ISO 3675	970
<b>Kinematická viskozita</b> při 40 °C při -20 °C	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	ISO 3104	28 1400
<b>Bod vzplanutí</b>	°C	ISO 2719	260
<b>Bod tuhnutí</b>	°C	ISO 3016	-60
<b>Průrazné napětí</b>	kV	IEC 60156	>75
<b>Ztrátový činitel</b> při 90 °C a 50 Hz	-	IEC 60247	<0,008
<b>Oxidační stabilita</b> Celková kyselost Kaly	(mg KOH).g <sup>-1</sup> % hm.	IEC 61125	0,01 <0,01

### 1.3 Rostlinné oleje

Další alternativou k minerálním olejům jsou vedle syntetických olejů i oleje rostlinné. Nejčastější využití nachází jako impregnant papírové izolace a v některých nízkonapěťových aplikacích. Poslední dobou se objevují studie [20, 21], které se zabývají použitím rostlinných olejů jako izolační a chladicí médium ve výkonových transformátorech. Hlavními důvody jsou šetrnost k životnímu prostředí, dobré elektrické vlastnosti, obnovitelnost a vysoký bod vzplanutí, který se obecně pohybuje nad hranicí 300 °C a je více než dvojnásobný oproti klasickým minerálním olejům. Nevýhodou ovšem je nižší oxidační stabilita, velké množství vody vázané na molekuly oleje a vyšší viskozita. Rostlinné oleje mají kvůli těmto nedostatkům omezené použití ve vysokonapěťových aplikacích. Pokud jsou ale zařízení dimenzována a konstrukčně přizpůsobena pro použití tohoto typu oleje, lze je využít jako náhradu za oleje na ropné bázi [21].

V elektrotechnice používané rostlinné oleje jsou svým složením směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Získávají se lisováním semen olejnatých rostlin nebo olejnatého dřeva s následnou rafinací, což je technologický proces, při kterém se olej vyčistí od nežádoucích složek. Dle interakce s okolním prostředím se dělí na dvě základní skupiny – na vysýchavé a nevysýchavé.

U vysýchavých olejů dochází při styku se vzduchem za působení tepla a světla k chemické reakci vedoucí ke ztvrdnutí na povrchu. V případě, že je olej nanesen na pevný podklad (např. papírová izolace), dochází k vyschnutí a vytvoření tenké lesklé vrstvy s dobrými izolačními vlastnostmi. Zvýšením teploty, intenzity světla a katalyzátory lze chemický proces vyschnutí urychlit. Vysýchavých olejů se v elektrotechnice využívá jako laků zvyšující elektroizolační, mechanické i tepelné vlastnosti základního materiálu. Nejčastěji používaný vysýchavý olej je lněný a dřevný olej. Lněný olej získáváme lisováním semen lnu a dřevný olej lisováním semen tungového stromu. Výhodou dřevného oleje v porovnání s olejem lněným je skutečnost, že schne rychleji a po vyschnutí má jeho vrstva větší odolnost vůči vnikání vlhkosti. Nevýhodou dřevného oleje je ovšem jeho tepelné stárnutí, které se projevuje zkrěhnutím, popraskáním a odlupováním od povrchu [4, 22].

U nevysýchavých olejů se nejčastěji setkáváme s ricinovým olejem získávaného z lisovaných semen skočce. Ve studii [23] zaměřené na měření jednotlivých parametrů ricinového oleje bylo zjištěno, že pokud je olej vhodně upraven (např. aditivy), tak by měl být schopen vykonávat elektroizolační a chladící funkci v transformátorech. Naměřené hodnoty přeskokového napětí, relativní permitivity a čísla kyselosti splňovaly normami stanovené požadavky, problém byl u hodnot ztrátového činitele  $\tan \delta$  a viskozity, kde již byly limitní hodnoty norem mírně překročeny. Bezproblémové použití tohoto typu oleje by vyžadovalo dalších úprav.

Podobné závěry vyplývají i ze studie [37] zkoumající vlastnosti řepkového oleje. Stejně jako v předchozím případě nesplňuje všechna omezení stanovená v normách (například nesplňuje požadavky např. na viskozitu, ztrátový činitel). Řepkový olej je navíc velmi náchylný k navlhání, tedy k absorpci vodních par z okolního vzduchu, a následnému zhoršování jeho parametrů (obzvláště snižování přeskokového napětí). Použití řepkového oleje jako plnicí kapaliny v transformátorech tedy vyžaduje jeho důkladné vysušení a aplikaci v hermeticky uzavřených nádobách.

### 1.3.1 Charakteristika zástupce skupiny rostlinných olejů

Vhodným rostlinným olejem pro použití v elektrotechnice je Envirotemp FR3. Díky svému složení, které nezahrnuje ropu, halogeny, silikony ani jiné problematické materiály, je šetrný ke svému okolí. Základ tvoří pouze přírodní estery, které jsou snadno odbouratelné jak ve vodě, tak i v půdě. Je kompatibilní s běžně používanými materiály v transformátorech a jinými zařízeními využívající olej.

Během testů [25], při kterých se srovnávaly indikátory stárnutí (oxidační stabilita, změna viskozity a dielektrických ztrát) různých rostlinných olejů (kukuřičný, řepkový, olivový, slunečnicový a Envirotemp), vyšlo najevo, že právě izolační kapalina Envirotemp FR3 vykazovala největší stálost a výkonnost ze všech testovaných. Naopak nejhůře dopadl slunečnicový olej, jehož nízká oxidační stabilita a vysoké zvýšení viskozity nejsou dobrými předpoklady pro použití v transformátorech navzdory jeho dobrým elektrickým vlastnostem. Test byl ovšem ovlivněn skutečností, že pouze olej FR3 byl speciálně upraven pro vysokonapěťové aplikace.

Předmětem jiného výzkumného článku [47], který se zabývá touto problematikou, bylo srovnání izolačních kapalin Envirotemp FR3 a Biotemp ABB. Oba oleje jsou založeny na přírodních esterech a jsou upraveny pro použití v transformátorech. Výzkum byl zaměřen na sledování změn chemicko-fyzikálních parametrů (viskozita, číslo kyselosti, ztrátový činitel) při působení degradačních činitelů. Bylo zjištěno, že přítomnost vlhkosti v obou olejích způsobuje zvyšování ztrátového činitele a čísla kyselosti. Působení kyslíku ovlivňovalo především viskozitu, dále i ztrátový činitel. Vyšší teplota ovlivňovala všechny zmíněné parametry. Oba srovnávané oleje jsou parametrově podobné a během testů vykazovaly i podobné chování. Větší rozdíly byly naměřeny pouze u viskozity měřené při 40 °C bez působení degradačních činitelů, kde olej Envirotemp FR3 vykazoval hodnotu  $36 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  a olej Biotemp hodnotu  $40 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Izolační olej FR3 je tedy vhodným médiem ve vysokonapěťových zařízeních díky své odolnosti proti stárnutí a dobrým elektrickým vlastnostem, jež jsou podobné minerálnímu oleji. V *Tab. 4* je seznam některých výrobcem udávaných vlastností.

**Tab. 4** - Vybrané vlastnosti oleje Envirotemp FR3 udávané výrobcem [24]

Vlastnost	Jednotka	Metoda	Hodnota
<b>Hustota</b> při 25 °C	kg.m <sup>-3</sup>	ASTM D1298	920
<b>Viskozita</b> při 40 °C při 100 °C	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	ASTM D445	33 8
<b>Bod vzplanutí</b>	°C	ASTM D92	330
<b>Bod tuhnutí</b>	°C	ASTM D97	-21
<b>Průrazné napětí</b>	kV	ASTM D877	47
<b>Ztrátový činitel</b> při 25 °C	%	ASTM D924	0,05
<b>Rel. permitivita</b> při 25 °C	-	ASTM D924	3,2
<b>Oxidační stabilita</b> Celková kyselost	(mg KOH).g <sup>-1</sup>	ASTM D974	0,022

#### 1.4 Porovnání vybraných vlastností jednotlivých zástupců

Pokud porovnáme jednotlivé parametry zástupců všech tří skupin izolačních olejů (viz. Příloha A), zjistíme, že každá kapalina má své přednosti i nedostatky. Ačkoliv se v současné době výrobci energetických zařízení snaží nahradit oleje na ropné bázi různými alternativami, tak ne vždy mají tyto náhrady v podobě syntetických či rostlinných izolačních kapalin lepší vlastnosti.

Zástupce minerálních olejů Shell Diala D má například nejmenší hustotu ze všech porovnávaných. Hodnota 881 kg.m<sup>-3</sup> není oproti hustotě 970 kg.m<sup>-3</sup> u Midelu či 920 kg.m<sup>-3</sup> u kapaliny FR3 výrazně menší a u malých olejových transformátorů, kde olejová náplň činí několik desítek či stovek litrů oleje, se rozdíl v celkové hmotnosti smazávají. Hustota oleje má význam až u transformátorů nejvyšších výkonů (řádově stovky MVA), ve kterých mohou být desítky tisíc litrů kapaliny a výsledná hmotnost se může lišit až o několik tun.

I kinematická viskozita se řadí mezi přednosti minerálního oleje Diala D. Její hodnota je opět nejmenší (17,3 mm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>), navíc je výrobcem udávaná při 20 °C.

Viskozitu elektroizolačních kapalin Midel i FR3 udávají výrobci při 40 °C a i přesto jsou jejich hodnoty zhruba dvojnásobné (s rostoucí teplotou viskozita klesá). V teplotách pod bodem mrazu je situace podobná, viskozita u syntetické kapaliny Midel je při -30 °C přibližně dvakrát horší ( $1400 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) než u minerálního oleje ( $730 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), výrobce rostlinného oleje FR3 hodnotu při těchto teplotách neudává. Viskozita je důležitá především z hlediska chlazení, neboť oleje s nízkou viskozitou se lépe dostanou do pórů papírové izolace a lépe proudí nádobou či radiátory, pokud je jimi transformátor vybaven.

Bod vzplanutí je naopak parametr, kde minerální olej vykazuje mnohem horší hodnoty, než jeho alternativy. Nejvyšší bod vzplanutí má při 330 °C rostlinný olej Envirotemp FR3, o 70 °C méně má syntetický Midel. Izolační kapalina Diala D je ropným produktem, a proto má bod vzplanutí hodnotu pouze 138 °C. V případech, kde je kladen důraz na požární bezpečnost, by tedy mělo být využíváno syntetických nebo rostlinných kapalných izolantů.

Bod tuhnutí je parametr důležitý při velmi nízkých teplotách, kdy může u olejů dojít k přechodu z kapalného skupenství do pevného. U zástupce minerálních olejů dochází ke ztuhnutí při -60 °C, stejně tak jako u oleje Midel 7131. Rostlinný olej Envirotemp FR3 začne tuhnut již při -21 °C, a proto není vhodné ho použít v extrémně nízkých teplotních podmínkách.

Dalším údajem, který výrobci udávají ve svých technických dokumentacích k elektroizolačním olejům, je průrazné napětí měřené na polokulových elektrodách s odstupem 2,5 mm. Nejnižší hodnotu z porovnávaných olejů má rostlinný (47 kV). Výrobce minerálního oleje Diala D udává hodnotu po úpravě >70 kV. Nejvyšší hodnotu průrazného napětí má dle technické dokumentace syntetický olej Midel (>75 kV).

Mezi elektrické vlastnosti izolačních olejů se dále řadí ztrátový činitel. Hodnoty ztrátového činitele minerálního a syntetického oleje byly měřeny při 90 °C, výrobce rostlinného oleje udává hodnotu při 25 °C, a proto je nejmenší (0,0005). Přímé srovnání tedy umožňují pouze první dva jmenovaní. Menší hodnotu ztrátového činitele 0,001 má olej Diala D, u oleje Midel uvádí výrobce hodnotu <0,008.

## 2 Degradční parametry izolačních kapalin

U každého zařízení dochází během jeho používání ke stárnutí. Po dosažení určitého stupně zestárnutí je životnost zařízení u konce a musí se provést ukončení provozu anebo prodloužení životnosti vhodným způsobem. U transformátorů je životnost dána především rychlostí stárnutí jeho elektroizolačního systému, který je tvořen kombinací olejové a papírové izolace. Mezi degradací olejové náplně a papírem existuje vzájemný vztah, jelikož produkty vzniklé při degradaci oleje jsou absorbovány papírem a naopak. Zestárlá olejová náplň se tedy musí před ukončením své životnosti zregenerovat či vyměnit, jinak by došlo k rychlé a nevratné degradaci papírové izolace [38].

Stárnutí lze charakterizovat jako postupné změny fyzikálních, chemických či elektrických parametrů elektroizolačního systému důsledkem působení jednoho či více faktorů. O jednofaktorovém působení hovoříme v případě, že o stárnutí rozhoduje zejména jeden hlavní faktor a ostatní vlivy jsou proti němu zanedbatelné. Vícefaktorové působení zahrnuje několik současně působících faktorů, které se na stárnutí podílejí takovou měrou, že ji již nelze zanedbat [4].

Vlastnosti olejové náplně transformátorů jsou ovlivňovány zejména působením teploty, vlhkosti a oxidačním stárnutím.

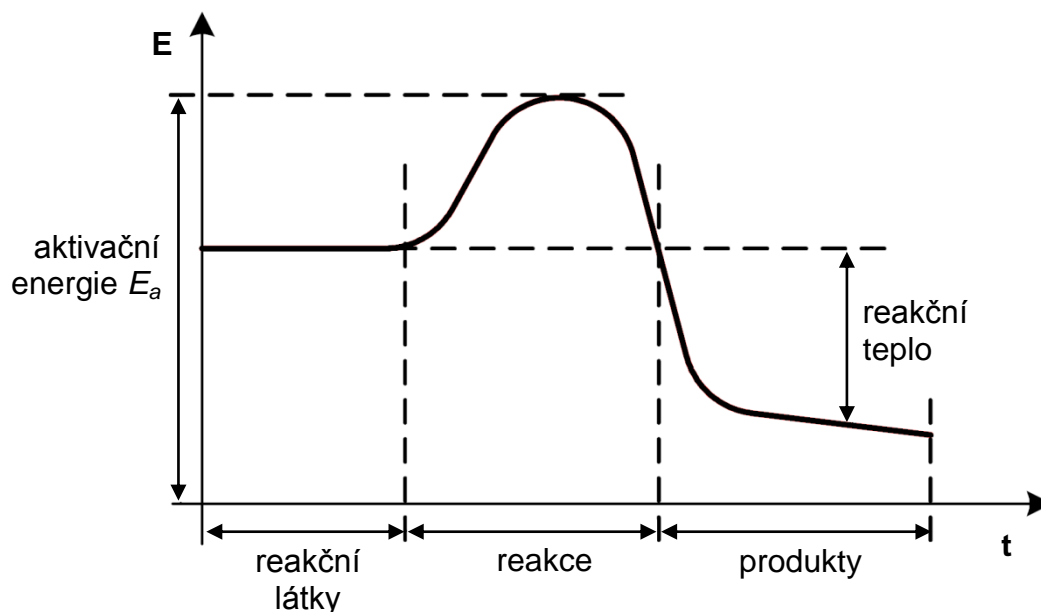
### 2.1 Působení teploty

Při provozu transformátoru dosahuje izolační olej teploty  $60 \pm 10$  °C, kdy olej stárne přirozeně (nezrychleně). Pokud je ovšem teplota média vyšší, dochází ke zrychlenému tepelnému stárnutí, které je doprovázeno elektrochemickým rozkladem papírové izolace a dále vznikem různých plynů, jež se částečně rozpouštějí v oleji a tím zhoršují jeho kvalitu. Zvýšení teploty může být dvojího charakteru: globální (v celém objemu) a lokální (v některých místech). Globální oteplení transformátoru způsobuje například zvýšení jeho zatížení či špatný stav chlazení. Lokální zvýšení teploty je zapříčiněno například elektrickými poruchami (oblouk, jiskry aj.) [22].

Jelikož teplota urychluje různé degradační pochody ve struktuře oleje, má vliv na vlastnosti jako je například rezistivita, ztrátový činitel, viskozita.



Spuštění degradačních procesů vzniká dodáním energie (v tomto případě tepelné), která umožňuje jednotlivým částicím překonat energetické bariéry. Tuto energii nazýváme aktivační a její jednotkou je  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Pokud tedy látce dodáme aktivační energii, částice opouští svůj stabilní stav a způsobí tím započetí degradačních dějů ve struktuře oleje (viz Obr. 1). Platí, že čím je aktivační energie větší, tím větší je i chemická odolnost daného oleje [39].



**Obr. 1** – Aktivační energie [2]

Rychlost, jakou bude reakce (respektive proces stárnutí) probíhat, je závislá na teplotě a množství reagujících látek. Tuto závislost popisuje rychlostní konstanta  $k$  dle Arrheniovy rovnice [2]:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}}$$

kde  $k$  je rychlostní konstanta

$A$  je faktor udávající frekvenci střetávajících se molekul [ $\text{s}^{-1}$ ]

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

$R$  je univerzální plynová konstanta  $8,31441 \text{ [J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}]$

$T$  je absolutní teplota [K].

## 2.2 Působení vlhkosti

Přítomnost vlhkosti v oleji je dalším parametrem, který ovlivňuje rychlost jeho stárnutí a zároveň snižuje elektrickou pevnost oleje i pevné izolace. Hlavním zdrojem vlhkosti oleje v elektrických zařízeních je voda vnikající z okolního vzduchu. Do styku s ním může přijít již při samotné výrobě, manipulaci, uskladnění dále při plnění stroje, údržbách, při netěsnostech nádoby aj. Izolační systém složený z pevné a kapalné izolace absorbuje vlhkost ve třech fázích. Nejprve je voda přijímána pouze olejem. V okamžiku, kdy je olej nasycen vlhkostí do určitého stupně, dochází k absorpci veškeré další vody pevnou izolací. Po určité době nastane vyrovnání obsahu vody v pevné a kapalné izolaci a další přijímaná vlhkost přechází do obou částí izolačního systému současně [40].

V elektroizolačních olejích se vlhkost může vyskytovat v podobě volné, rozpuštěné či emulgované vody. Rozpuštěná voda se do oleje dostane pohlcením a udržením vzdušné vlhkosti, a proto je důležité co nejvíce zamezit styku oleje s okolním vzduchem při jeho manipulaci, provozu či uskladnění. Emulgovaná voda je tvořena mikroskopickými kapkami, které tvoří s olejem emulzi. Tato emulze je velmi stálá a těžko odstranitelná. Voda usazená na dně nádoby se nazývá volná voda a neovlivňuje přímo vlastnosti oleje, ovšem její přítomnost indikuje jiné formy vody v oleji. Určité množství volné vody může vlivem teploty a stavu izolačního oleje přecházet do oleje a měnit se tak na vodu rozpuštěnou nebo emulgovanou [28, 40].

Dalším způsobem, jak může v oleji vzniknout voda, je oxidační stárnutí. Zde je voda produktem chemických reakcí a nazýváme jí vodou reakční [28].

## 2.3 Oxidační stárnutí

Oxidační stárnutí je dalším degradačním parametrem způsobující stárnutí elektroizolačních olejů. Jakou rychlostí a do jaké míry bude oxidační stárnutí probíhat, závisí na přítomnosti látek zpomalující či zrychlující oxidační reakce, na chemickém složení oleje a na teplotě, která hraje důležitou roli při oxidačních reakcích. Mezi hlavní činitele vyvolávající oxidační stárnutí patří zvýšená teplota, přítomnost kyslíku nebo vzduchu a přítomnost kovů, zejména mědi a železa. Naopak zpomalit tyto degradační pochody lze například zmenšením plochy, kterou se olej stýká se vzduchem. Ještě lepší je však úplné zamezení přístupu kyslíku k elektroizolačnímu oleji, což se provádí zakonzervováním oleje inertním plynem

v hermeticky uzavřených nádobách. Dalším způsobem, jak omezit oxidaci izolační kapaliny, je přidání látek s inhibičními účinky, které zneškodňují vzniklé radikály anebo potlačují jejich vznik. Inhibitor se přidává v množství 0,3 % až 0,5 % hmotnosti oleje, během provozu ovšem dojde k jeho postupnému spotřebování [5, 10, 40].

Produkty oxidace oleje jsou kyslíkaté organické sloučeniny, které vznikají vlivem volných radikálů. Dále může v oleji vznikat oxid uhličitý a výše zmíněná reakční voda jako vedlejší produkt [22].

Oxidační stárnutí oleje má vliv na jeho elektrické, chemické i fyzikální vlastnosti, zejména na parametry jako je ztrátový činitel, číslo kyselosti či barva [2].

### 3 Hodnocení stavu izolačních kapalin

Abychom mohli zhodnotit aktuální stav izolační kapaliny, musíme aplikovat celý soubor diagnostických metod, jelikož pro charakterizování jednotlivých vlastností je nutné použít různých postupů. Klasické metody založené na fenomenologickém<sup>1</sup> přístupu jsou často používány, ovšem ne vždy zcela dostatečné. Pokud totiž chceme pozorovat změny ve struktuře materiálu, musíme využít metod strukturálních<sup>2</sup> (např. infračervená spektroskopie).

Jednotlivé jakostní parametry izolačních kapalin by se měly pohybovat v určitých intervalech, které jsou stanoveny odbornými normami, případně jsou doporučeny výrobcem nebo provozovatelem zařízení. Kvalitativní požadavky musejí být splněny nejen u olejů nových, ale také u kapalin používaných, u kterých dochází během provozu ke změně jeho parametrů a je nutná pravidelná kontrola ve stanovených intervalech, aby nedošlo k překročení limitních hodnot [2].

Základní dělení vlastností izolačních kapalin je na elektrické, fyzikální a chemické.

#### 3.1 Elektrické vlastnosti izolačních kapalin

Mezi nejčastěji stanovované elektrické parametry izolačních kapalin patří elektrická pevnost, vnitřní rezistivita a ztrátový činitel. V následujících bodech jsou uvedené parametry blíže rozebrány.

##### 3.1.1 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je definována jako poměr průrazného napětí vztaženého na vzdálenost zkušebních elektrod, což lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1)$$

kde  $E_p$  je elektrická pevnost [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ]

$U_p$  je průrazné napětí [ $\text{kV}$ ]

$d$  je vzdálenost elektrod [ $\text{mm}$ ].

<sup>1</sup> Fenomenologický přístup je zaměřen na reakce diagnostikovaného objektu na diagnostické signály.

<sup>2</sup> Strukturální přístup sleduje změny ve struktuře diagnostikovaného objektu.

Pro izolační kapaliny se používá vzdálenost elektrod 2,5 mm. Napětí naměřené v momentu vzniku prvního výboje mezi elektrodami se bere jako průrazné napětí. Hodnota elektrické pevnosti je závislá na obsahu vody, nečistot, obsahu plynů a produktů stárnutí, během zkoušek může být výsledná hodnota ovlivněna rovněž dobou působení napětí, počtem průrazů, čistotou zkušební nádoby a elektrod, dobou působení okolního vzduchu na olej. Důležitá je i délka intervalů mezi jednotlivými přeskoky, v níž olej obnovuje své elektroizolační schopnosti.

Měření se provádí automatickým zkušebním přístrojem (Obr. 2) s nádobkou o objemu 350 ml až 600 ml a dvěma půlkulovými elektrodami. Vzorek musí být nalit do nádoby po stěně tak, aby nevznikly v jeho objemu vzduchové bublinky [2].



**Obr. 2** – Zkušební přístroj HCL7808 [30]

### 3.1.2 Vnitřní rezistivita

Každý technický izolant má určitou nenulovou vodivost, která je způsobena znečištěním, příměsmi, vlhkostí a různými cizími složkami. Pro hodnocení materiálů z hlediska jejich elektrické vodivosti využíváme rezistivity  $\rho$  (měrného elektrického odporu) a konduktivity  $\gamma$  (měrné elektrické vodivosti). Protože jsou veličiny měrné (přepočítané na jednotku objemu – krychle daného materiálu s délkou hrany 1 m), můžeme je mezi sebou snadno porovnávat [26].

Vzájemný vztah obou zmíněných veličin je v následující:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad (2)$$

kde  $\rho$  je rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ]

$\gamma$  je konduktivita [ $S \cdot m^{-1}$ ].

Rezistivita je u izolačních olejů rovněž závislá na teplotě, což je ověřeno například v [27]. S rostoucí teplotou dochází ke snižování viskozity, zvětšuje se pohyblivost iontů a částic, důsledkem čehož je snížení rezistivity respektive zvětšení elektrické vodivosti.

Vnitřní rezistivitu vypočteme z odporu měřeného dle Ohmova zákona z přiloženého napětí a z proudu tekoucího daným vzorkem, který je zaznamenáván pikoampérmetrem [2]. Vztah pro výpočet je:

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \quad (3)$$

kde  $\rho_v$  je vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ]

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

$C_0$  je kapacita prázdné měřicí nádoby [F]

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

### 3.1.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel představuje velikost dielektrických ztrát, jež jsou přímo úměrné příkonu, který se při působení elektrického pole mění v teplo [2]. Tato ztrátová energie zvyšuje teplotu oleje, což zrychluje fyzikálně chemické pochody vedoucí k jeho stárnutí. Pokud by vznikající teplo nebylo v rovnováze s odvodem tepla do okolí, došlo by po čase k nadměrnému růstu teploty a následnému tepelnému průrazu.

Čisté izolační oleje bez příměsí polárního charakteru a jiných nečistot mají dielektrické ztráty dané pouze vodivostí dielektrika, která je malá, takže i dielektrické ztráty jsou malé. Závislost ztrátového činitele na teplotě má exponenciální charakter. U zestárlých izolačních olejů s nečistotami a příměsemi polárního charakteru jsou dielektrické ztráty dány součtem ztrát vodivostních a polarizačních a jsou tedy vyšší než u čistých olejů. Polarizační složku tvoří přítomnost produktů oxidačního stárnutí, materiály rozpuštěné v oleji či jiných složek, zejména vody [28].

Při samotném měření se vzorek oleje vkládá do obvodu Scheringova můstku s jeho následným vyvážením. Další možností je použití automatického měřicího můstku

### 3.2 Fyzikální vlastnosti izolačních kapalin

V technických dokumentacích izolačních kapalin se u fyzikálních vlastností nejčastěji setkáváme s parametry hustota, viskozita, bod vzplanutí, bod tuhnutí, někdy výrobci udávají i barvu oleje. Následující body jsou zaměřeny na popis těchto parametrů.

#### 3.2.1 Hustota

Jelikož množství olejové náplně ve výkonových transformátorech je značné, hustota oleje ovlivňuje výslednou hmotnost zařízení. I přesto patří v diagnostice kapalin hustota k méně důležitým parametrům, protože necharakterizuje produkty stárnutí přímo [2].

Nejsnadněji se dá hustota určit z objemu a hmotnosti dané kapaliny ze vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

kde  $\rho$  je hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

$m$  je hmotnost [g]

$V$  je objem [ $\text{cm}^3$ ].

Doporučeno je ovšem stanovit hustotu pomocí hustoměru, který pracuje na principu Archimédova zákona, kdy je odčítána hloubka ponoru plavajícího tělesa (hustoměru) ve zkoušeném oleji. Po ustálení polohy hustoměru se na stupnici odečte hodnota přímo v  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Přesné stanovení hustoty umožňují pyknometry (Obr. 3), jejichž princip je založen na úplném naplnění a následném uzavření nádoby zátkou s kapilárou, kterou odteče ven přebytečné množství kapaliny. Tím je zaručeno vždy stejné množství náplně v nádobě. Následně se využije vztahu (4), kde se za  $m$  dosadí rozdíl



Obr. 3 – Pyknometr [29]

hmotností naplněného a prázdného pyknometru. Nejčastěji je hustota měřena a následně udávána v technické dokumentaci při 20 °C [2].

### 3.2.2 Viskozita

Viskozita je vlastnost všech kapalin, která se projevuje třením jednotlivých sousedních vrstev při jejich vzájemném pohybu. Jinými slovy charakterizuje vnitřní tření kapalin a je závislá na přitažlivých silách mezi částicemi. Čím větší jsou přitažlivé síly jednotlivých částic, tím větší je viskozita, která způsobuje větší brzdění pohybu samotné kapaliny nebo těles v objemu kapaliny. To může být problém především u chlazení transformátorů, kde je vyžadována dobrá tekutost z důvodu snadného proudění izolačního média. Navíc se viskozita s klesající teplotou ještě zvyšuje. Při výběru vhodného oleje tedy nesmíme zanedbat tento parametr [2, 31].

K měření viskozity lze využít různých viskozimetrů s odlišnými konstrukcemi. Rozlišujeme tyto základní principy: kapilární, tělískové a rotační. Kapilární neboli průtokové viskozimetry fungují na principu měření tlakové ztráty při proudění kapaliny kapilárou. Tělísková metoda je založena na měření času, po který padá kulička svislou či šikmo postavenou trubicí naplněnou měřenou kapalinou. Rotační princip určuje viskozitu ze síly, kterou musíme vyvinout k otáčení předmětu v oleji [2, 31].

Uvedené metody se využívají pro stanovení dynamické viskozity, která je definována jako síla potřebná na posunutí vrstvičky oleje o ploše 1 m<sup>2</sup> oproti stejné vrstvičce vzdálené 1 m ve vodorovném směru o 1 m [4]. Pro účely diagnostiky je ovšem měřena viskozita kinematická, jež je uváděna výrobci v technických dokumentacích. Přepočítání mezi dynamickou a kinematickou viskozitou je následující:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho \cdot 10^3} \quad (5)$$

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

$\eta$  je dynamická viskozita [Pa.s]

$\rho$  je hustota měřené kapaliny při teplotě určování viskozity [g.cm<sup>-3</sup>].



### 3.2.3 Bod vzplanutí a bod tuhnutí

Teplota vzplanutí je stanovena jako nejnižší teplota, při které se za přesně definovaných podmínek utváří nad hladinou kapaliny taková směsice vzduchu a vypařeného oleje, že po přiblížení plamene dojde k jejich vzplanutí a následnému rychlému uhasnutí. Pokud ovšem nedojde při určité teplotě k okamžitému zhasnutí plamene, ale trvalému hoření par, nazýváme tuto teplotu bodem hoření. Oba zmíněné parametry jsou důležité především z hlediska požární bezpečnosti. K měření bodu vzplanutí se využívá analyzátorů (Obr. 4) pracujících podle Pensky-Martensova principu popsaného výše. Jedná se o metodu pracující s uzavřeným kelímkem. Jako inicializační zdroj se používá buďto plynový plamének nebo elektrická spirála s automatickým zapalováním [2, 32].



**Obr. 4** – Analyzátor PMA-4 [32]

Opačným případem jsou nízké teploty, kdy se u kapalin zvyšuje viskozita a snižuje se jejich chladicí schopnost. Teplota, při které dochází k přechodu do pevného skupenství, se nazývá bod tuhnutí. Tato přeměna skupenství je závislá na chemickém složení a čistotě měřeného oleje. Bod tuhnutí je důležitý především při spouštění a provozu transformátorů při teplotách hluboko pod bodem mrazu. Jelikož chladicí médium necirkuluje, může snadno dojít k lokálnímu přehřátí transformátoru. K měření se používá zkumavky, do které se nalije zkoušený vzorek. Poté je zkumavka postupně ochlazována vždy o 2 °C a nakloněním se zkouší, zda je olej ještě tekutý. Za bod tuhnutí se označí teplota, při které se vzorek po naklonění zkumavky do vodorovné polohy nepohne po dobu přibližně 5 s.

### 3.3 Chemické vlastnosti izolačních kapalin

Tato podkapitola je zaměřena na popis vybraných chemických parametrů izolačních kapalin. Výrobci nejčastěji udávají hodnoty obsahu vody v oleji, číslo kyselosti.

### 3.3.1 Obsah vody v oleji

Přítomnost vody v izolačním oleji způsobuje zhoršení dielektrických vlastností, zejména jeho elektrické pevnosti. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.2, voda se může elektroizolačním systému nacházet ve třech podobách, a to jako rozpuštěná, emulgovaná či jako voda volná.

Měřením vody v kapalných izolantech se zjistí voda rozpuštěná nebo emulgovaná, přítomnost volné vody se zpravidla nezjistí. Pro účely diagnostiky je nejvhodnější použití coulometrické titrační metody [2], která je založena na reakci vody s jódem, oxidem siřičitým, organickou bází a alkoholem v organickém rozpouštědle. Tato metoda je určena pouze ke zjištění obsahu vody ve vzorku oleje, nikoliv ke zjištění celkového navlhnutí izolačního systému stroje, jelikož více než 99% vody se nachází v pevných izolantech [40].

### 3.3.2 Číslo kyselosti

Číslo kyselosti udává množství hydroxidu draselného (KOH) v miligramech, které je potřebné k neutralizaci kyselých reagujičích složek v 1 g izolačního oleje. U nových nepoužitých olejů se změřením čísla kyselosti dá určit stupeň rafinace. Nedokonalá rafinace má za důsledek přítomnost různých kyselin v oleji. U zestárých olejů se množství kyselin zvětšuje a číslo kyselosti zde slouží k posouzení stupně zestárnutí. Problémem je zde ovšem fakt, že číslo kyselosti indikuje až látky vyššího oxidačního stupně a nezachycuje počátek stárnutí izolačních olejů [28].

Pro měření čísla kyselosti využíváme dvou metod, a to potenciometrickou metodu nebo stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B [2]. Potenciometrická metoda je založena na stanovení čísla kyselosti z množství báze v miligramech hydroxidu draselného na gram vzorku, které zneutralizuje zkoušený vzorek ve



**Obr. 5** – Titrátor TitroLine Easy [33]

speciálním roztoku. Měření probíhá na automatickém titrátoru (příklad Obr. 5). Metoda stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř pracuje na principu titrace (bezezbytkové reakce) kyselin ve zkoušeném vzorku s roztokem hydroxidu draselného (přimíchán toluen, etanol a indikátor – alkalická modř).

### 3.4 Strukturální metody pro hodnocení stavu kapalin

Zkušenosti s fenomenologickým přístupem jsou na vysoké úrovni, protože diagnostické metody založené na tomto principu se používají již dlouhou dobu. I přes tuto skutečnost roste význam strukturálního přístupu, který je sice náročnější a vyžaduje dražší přístroje, ale poskytuje nám podrobné informace o strukturálních procesech v materiálu a menší rozptyl výsledků. Z uvedeného lze usoudit, že strukturální metody mají větší vypovídající schopnosti než metody založené na fenomenologickém přístupu [34].

Z celého souboru strukturálních diagnostických metod (např. termogravimetrie TG – metoda založená na zjišťování hmotnosti; diferenční termická analýza DTA – metoda založená na měření energie; termomechanická analýza TMA – metoda založená na měření mechanických vlastností a celá řada dalších) se zaměřím na popis metody infračervené spektroskopie, která je běžně používanou metodou pro hodnocení izolačních kapalin.

#### 3.4.1 Infračervená spektroskopie

Jak už z názvu metody vyplývá, infračervená spektroskopie patří mezi analýzy spektroskopické, které se zabývají vznikem a vlastnostmi spekter a jsou založeny na vzájemné interakci elektromagnetického záření se vzorkem. Infračervená spektroskopie (též známá pod zkratkou IČ spektroskopie či anglicky Infrared Spectroscopy) je často používanou metodou v organické i anorganické chemii k analýze různých směsí a k získávání informací o struktuře látek. Infračervené záření, které prochází zkoumaným vzorkem, je absorbováno molekulami látky a poté přeměněno na energii, jež způsobí vibraci právě těchto molekul. K absorpci záření zkoušeným vzorkem dochází v případě, pokud se rovná energie IČ záření energii některé z molekulových vibrací [2, 34].

Zařízení používaná v infračervené spektroskopii se nazývají spektrometry a rozdělujeme je dle principu na disperzní a nedisperzní. Disperzní spektrometry se

začaly používat ve 40. letech minulého století a pracují na principu rozkladu světla. Jejich nevýhodou je, že neumožňují analyzovat silně absorbující pojiva výztuže, takže z pevných materiálů šlo analyzovat pouze práškové vzorky, které navíc vyžadovaly složitou přípravu. Modernější nedisperzní spektrometry, jejichž zástupcem je spektrometr s Fourierovou transformací, pracují na principu interference světla a jsou rychlejší a citlivější [2, 34].

Výstupem analýzy je infračervené spektrum, které graficky zobrazuje funkční závislost energie vyjádřené v procentech transmitance  $T$  nebo jednotkách absorbance  $A$  na vlnové délce dopadajícího záření na vzorek. Transmitance neboli propustnost je definována jako poměr intenzity záření propuštěné vzorkem a intenzity záření generované zdrojem [35], což lze vyjádřit vztahem (6):

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

kde  $T$  je transmitance [%]

$I$  je intenzita záření prošlá vzorkem [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$I_0$  je intenzita záření generovaná zdrojem [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

Absorbance je definována jako dekadický logaritmus z převrácené hodnoty transmitance, vztah pro výpočet je:

$$A = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (7)$$

kde  $A$  je absorbance [-]

$T$  je transmitance [%].

## 4 Experimentální část

Izolační systém elektrických strojů podléhá během provozu stárnutí, které je urychlováno několika faktory. Jedním z hlavních degradačních faktorů je nadměrná teplota, proto se v experimentální části diplomové práce měřilo teplotní stárnutí regenerovaného minerálního transformátorového oleje s ohledem na stanovení životnostní křivky. Původně mělo být provedeno porovnání vybraných vlastností zástupců z různých skupin izolačních kapalin, ovšem v průběhu experimentu došlo po domluvě s vedoucím diplomové práce k modifikaci činnosti. Tato část zadání je provedena formou rešerše společně s prvním bodem zadání v úvodní části práce.

Pro stanovení životnostní křivky zkoušeného oleje je nejprve nutné zvolit parametr, který je citlivý na proces tepelného stárnutí. Z pohledu elektrických vlastností splňuje tento požadavek například ztrátový činitel, jelikož dle teoretických předpokladů [26] se vzrůstající teplotou roste a závislost má exponenciální charakter.

Aby bylo možné zkonstruovat životnostní křivku, zkušební vzorky musí být dle normy ČSN EN 60216-1 [45] vystaveny vlivu teploty při minimálně třech různých teplotách. Testování životnosti izolačních materiálů je při běžných podmínkách časově velmi náročné, jelikož k dosažení limitních hodnot dochází po dlouhé době (materiál je na tyto podmínky přizpůsoben). Z těchto důvodů se provádí zrychlené zkoušky, kdy je materiál vystaven vyšší intenzitě namáhání a časy pro získání výsledků jsou mnohem kratší. Proto byl olej stárnutý při teplotách 110 °C, 120 °C, 130 °C. Doby stárnutí na uvedených teplotách jsou zobrazeny v *Tab. 5*.

**Tab. 5** – Teploty a doby stárnutí měřených vzorků

Teplota stárnutí	110 °C	120 °C	130 °C
Doba stárnutí	500 hod	300 hod	100 hod
	1000 hod	500 hod	200 hod
	1250 hod	650 hod	350 hod
	1500 hod	750 hod	500 hod

Dále je nutné zvolit kritériální hodnotu měřeného parametru, v našem případě ztrátového činitele. K tomuto účelu posloužila podniková norma společnosti ČEZ, a.s.: Profylaktika elektrických strojů netočivých – výkonové transformátory [41].

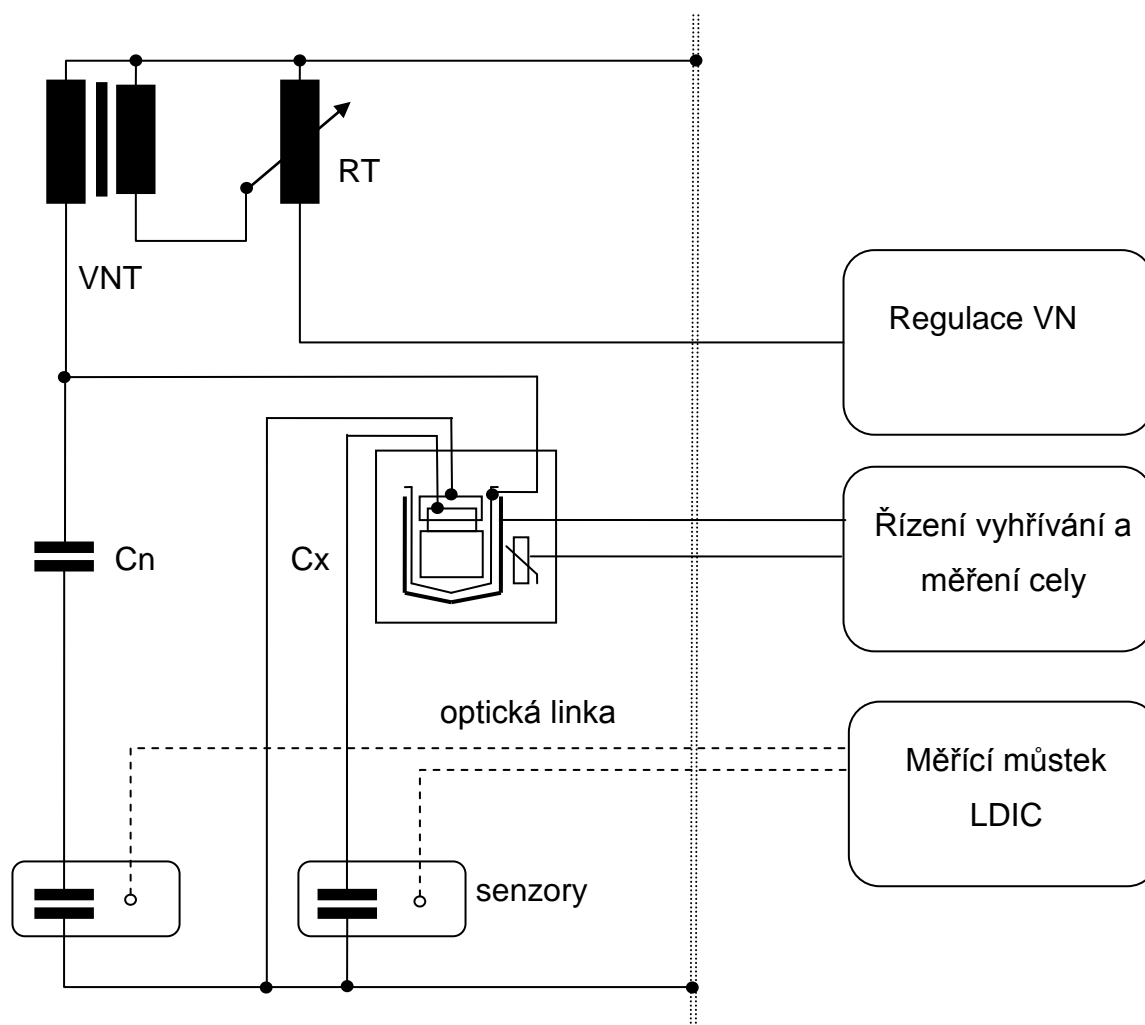
Výsledkem experimentu je životnost měřeného oleje vyjádřená křivkou, která

zobrazuje závislost doby do dosažení kritéria na teplotě oleje (110 °C, 120 °C a 130 °C). Z regresní rovnice lze poté dopočítat životnost oleje při libovolně zvolené teplotě.

#### 4.1 Měřicí pracoviště

Měření ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  probíhalo na poloautomatickém měřícím zařízení LDIC LDV-5 (viz Příloha B Obr. I + Obr. II), ke kterému byl připojen vysokonapěťový zdroj HIGH VOLT složený z řídicího modulu SM 4 a výkonového modulu LM 30 (viz Příloha B Obr. III). Zkoušený vzorek ve zkušební cele byl umístěn do vyhřívávaného elektrodového systému TETTEX 2903/RR řízeného teplotním regulátorem TETTEX 2965/SS přes teplotní měřící můstek TETTEX 2105c/RR (viz Příloha B Obr. IV). Vyhřívaná zkušební cela byla s měřícím zařízením spojena přes senzory LDIC (viz Příloha Obr. V).

Uspořádání celého měřicího pracoviště je schematicky znázorněno v Obr. 6:



Obr. 6 – Schéma zapojení měřicího pracoviště

## 4.2 Způsob měření

Měření se provádělo podle normy ČSN EN 60247 [44]. Ztrátový činitel se měří střídavým napětím  $U_{stř} = 500$  V.

Před měřením je nejprve nutné provést několik přípravných úkonů. Začíná se vyčištěním zkušební cely. Čistota zkušební cely je důležitá kvůli vysoké citlivosti izolačních kapalin na jakékoliv znečištění, které by se v cele mohlo nacházet.

Dalším krokem přípravy měření je smáčení zkušební cely, kdy se cela třikrát propláchne vzorkem oleje. Po jejím vyčištění a propláchnutí se měřený vzorek nalije do zkušební cely takovým způsobem, aby se zabránilo vzniku a zachycení vzduchových bublin v objemu oleje.

Součástí přípravy je i sušení olejové náplně. Zkoušený vzorek se ve zkušební cele zahřeje na  $110$  °C s následnou hodinovou výdrží na této teplotě při volných větracích otvorech. Důvodem je odstranění vlhkosti z oleje, která se do jeho objemu mohla dostat naléváním, manipulací s olejem atd.

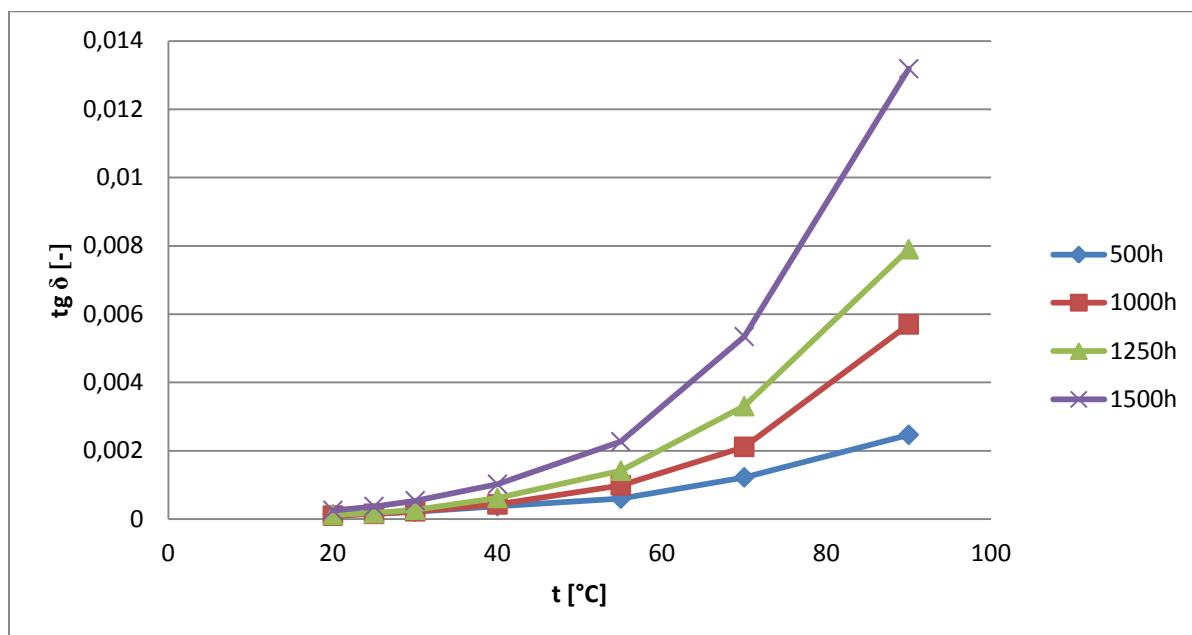
Následně se uzavřou větrací otvory, aby během měření nepřicházel olej do styku s okolním vzduchem a nedocházelo k jeho opětovnému navlhání.

Posledním krokem přípravy je chladnutí oleje, kdy se olej po vysušení při  $110$  °C nechá vychladnout na první měřicí teplotu  $90$  °C.

Poté se již může přistoupit k samotnému měření  $\text{tg } \delta$ . Měření ztrátového činitele probíhalo na měřicím zařízení LDIC LDV-5 výše uvedeným napětím o frekvenci  $f = 50$  Hz. V následujících krocích se olej nechá postupně chladnout na  $70$  °C,  $55$  °C,  $40$  °C,  $30$  °C,  $25$  °C a  $20$  °C a měření se na těchto teplotách opakuje.

## 4.3 Výsledky měření

Výsledky měření regenerovaného minerálního oleje stárnutého při  $110$  °C jsou pro názornost uvedeny v *Obr. 7*. Data použitá pro sestrojení závislosti ztrátového činitele oleje na teplotě jsou zobrazena v Příloze B *Tab. I*. Naměřené hodnoty ztrátového činitele izolačního oleje v závislosti na teplotě stárnutého při  $120$  a  $130$  °C jsou uvedeny v Příloze B *Tab. II*, *Tab. III*, *Obr. VII* a *Obr. VIII*.



**Obr. 7** - Závislost ztrátového činitele na teplotě (olej stárnutý při 110 °C)

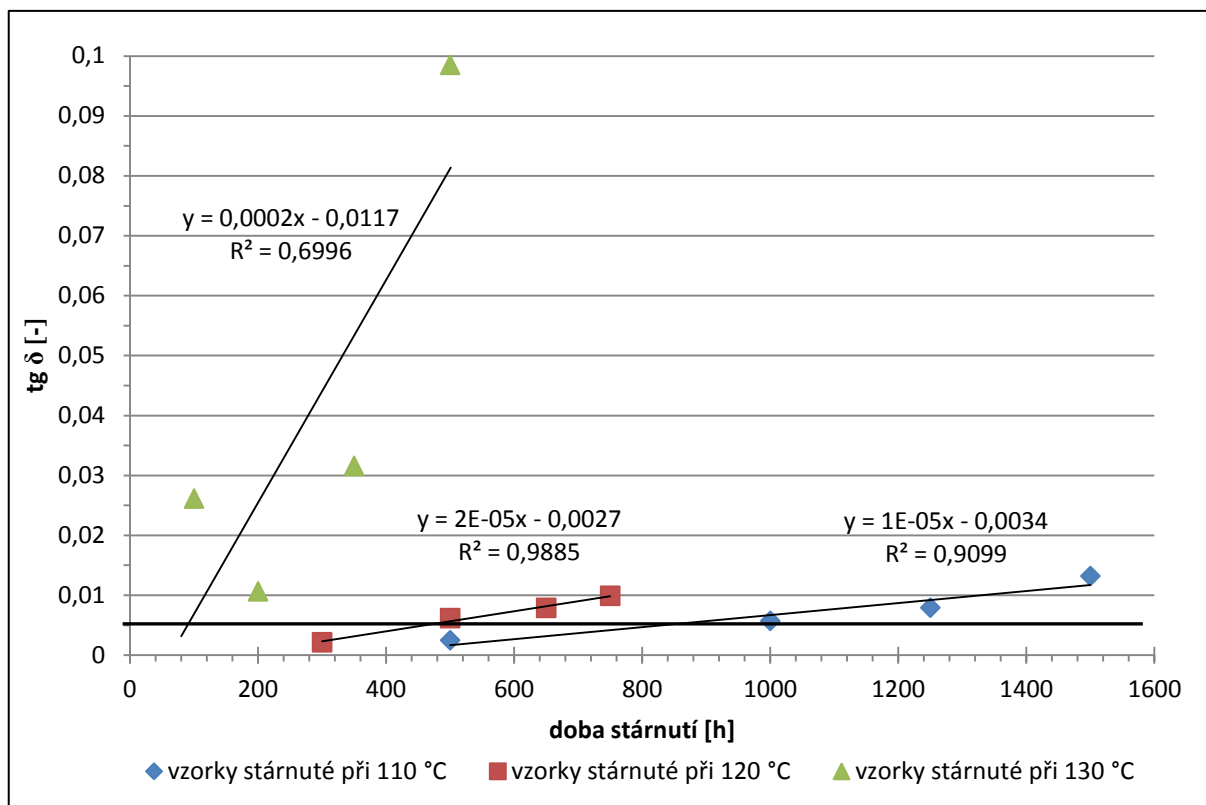
Dle očekávaných předpokladů je průběh ztrátového činitele odpovídající. Z grafu je patrné, že doba, po kterou byly vzorky oleje stárnuté při dané teplotě, měla vliv na kvalitu měřeného parametru. Důsledkem delší doby vystavení oleje zvýšenému teplotnímu namáhání je jeho větší zestárnutí, což se projevilo zhoršením měřeného parametru.

Pro vytvoření životnostní křivky zkoušeného oleje, která je výstupem celého měření, bylo nejprve nutné sestavit souhrnný graf (viz Obr. 8), kde se vynesly hodnoty ztrátového činitele oleje v závislosti na době stárnutí naměřené při 90 °C (pro vzorky stárnuté při 110 °C, 120 °C a 130 °C – viz Tab. 6), jelikož na této teplotě jsou odstupy mezi naměřenými hodnotami největší a lze tedy snáze sledovat změny. Poté se jednotlivé body proložily spojnicemi trendu, které popisují rovnice regrese.

**Tab. 6** – Ztrátový činitel oleje stárnutého při 110, 120 a 130 °C, hodnoty při 90 °C

110 °C	t [h]	500	1000	1250	1500
	tg δ	2,47E-03	5,70E-03	7,90E-03	1,32E-02
120 °C	t [h]	300	500	650	750
	tg δ	2,13E-03	6,16E-03	7,87E-03	9,88E-03
130 °C	t [h]	100	200	350	500
	tg δ	2,61E-02	1,06E-02	3,16E-02	9,85E-02





**Obr. 8** – Souhrnný graf závislosti ztrátového činitele na době stárnutí při 90 °C se zanesenou kritériální hodnotou  $\text{tg}\delta_{90} = 0,005$

Rovnice regrese získané z Obr. 8 jsou následující:

- pro vzorky stárnuté při 110 °C:  $y = 1E-05x - 0,0034$
- pro vzorky stárnuté při 120 °C:  $y = 2E-05x - 0,0027$
- pro vzorky stárnuté při 130 °C:  $y = 0,0002x - 0,0117$

Do jednotlivých rovnic regrese se za  $y$  (představující  $\text{tg } \delta$ ) dosadí kritériální hodnota ztrátového činitele vyjadřující jakostní mez, nad kterou by hodnota daného parametru neměla stoupnout, protože ztrátový činitel izolačního materiálu by měl být co nejmenší. Dle podnikové normy společnosti ČEZ, a.s. [41] bylo jako kritérium ztrátového činitele při 90 °C zvolena hodnota  $\text{tg}\delta_{90} = 0,005$  (Obr. 8), která platí pro transformátory napěťové hladiny 220 a 400 kV na konci záruční doby, tzn. na konci prvního roku provozu stroje. Toto kritérium bylo vybráno s přihlédnutím na skutečnost, že předmětem měření byl stárnutý regenerovaný minerální olej.

Dalším krokem k sestavení životnostní křivky oleje při daném kritériu je vyjádřit z rovnic regrese parametr  $x$ , který vyjadřuje dobu do dosažení kritéria. Pro snadnější pochopení je uveden příklad pro vzorek stárnutý při 110 °C:

$$y = 0,00001x - 0,0034, \quad (8)$$

z čehož po dosazení kritéria  $\text{tg}\delta_{90} = 0,005$  za  $y$  získáme:

$$0,005 = 0,00001x - 0,0034. \quad (9)$$

Po vyjádření  $x$  dostaneme dobu do dosažení kritéria:

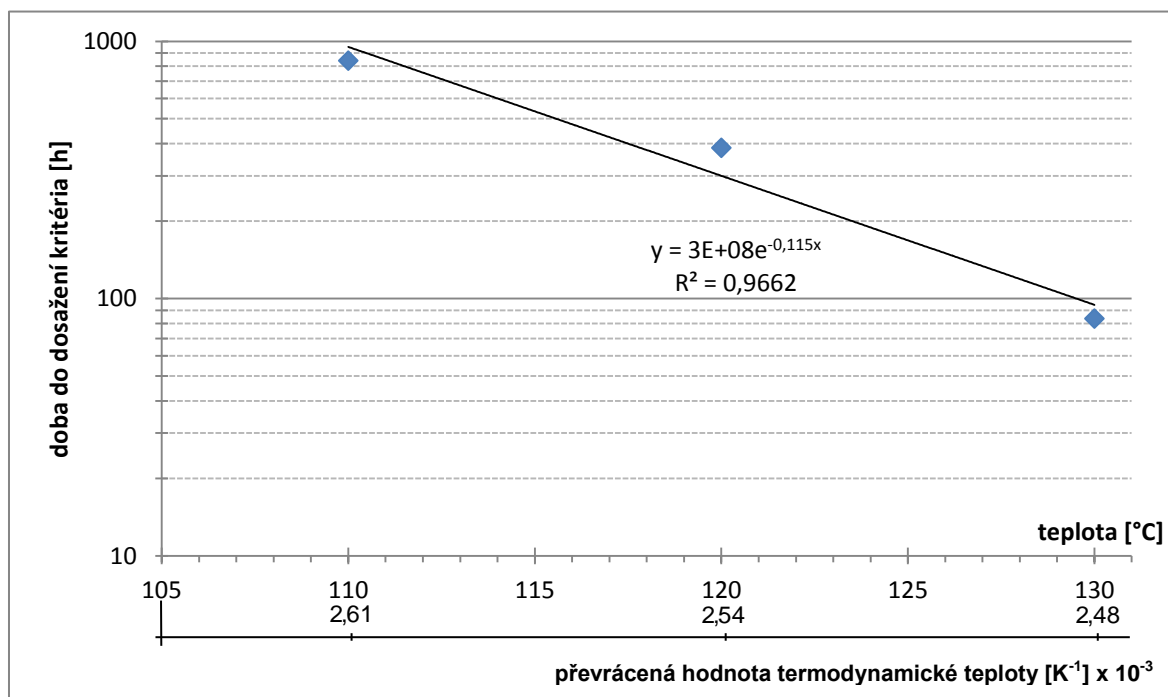
$$x = \frac{0,005 + 0,0034}{0,00001} = 840,0 \text{ hod} \quad (10)$$

Obdobným postupem, jak je naznačeno rovnicemi 8, 9 a 10, by se získaly časy do dosažení kritéria pro vzorky stárnuté při 120 a 130 °C. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce *Tab. 7*:

**Tab. 7** – Časy do dosažení kritéria  $\text{tg}\delta_{90} = 0,005$  pro vzorky stárnuté při dané teplotě

teplota [°C]	110	120	130
čas do dosažení kritéria [h]	840,0	385,0	83,5

Z *Tab. 7* se již může sestavit životnostní křivka měřeného oleje (*Obr. 9*) dle normy ČSN EN 60216-1.



**Obr. 9** - Životnostní křivka regenerovaného transformátorového oleje stárnutého při teplotách 110, 120 a 130 °C při kritériu  $\text{tg}\delta_{90} = 0,005$

Ze zjištěné životnostní křivky vyplývá, že čím vyšší je teplota, při které provozujeme transformátorový olej, tím rychleji v něm probíhají degradační procesy zkracující jeho životnost. Každé zvýšení teploty o 10 °C zkracuje dobu do dosažení kritériální hodnoty zhruba o 55 až 80 %, což potvrzuje Montsingerovo pravidlo, které uvádí, že se životnost izolace zkracuje na polovinu při každém zvýšení její provozní teploty o 8 °C [42]. Z výsledné rovnice regrese

$$y = 3E+08e^{-0,115x} \quad (11)$$

Ize dopočítat, že pokud by byl transformátor provozován za běžných podmínek a olejová náplň by měla teplotu 60 °C (teplota olejové náplně by se měla pohybovat v intervalu  $60 \pm 10$  °C [22]), tak doba do dosažení kritéria  $tg\delta_{90} = 0,005^3$  by byla 302336 hod (přibližně 34,5 roku), což je běžná hodnota životnosti transformátorů, která se plánuje v rozmezí 30 až 40 let [46].

Pokud je již stroj v provozu a pracuje v normálním stavu, je kritériální hodnota ztrátového činitele pro transformátory napěťové hladiny 400 kV a 220 kV při teplotě 90 °C stanovena na  $tg\delta_{90} = 0,06$  [41]. Z rovnice regrese v Příloze B Obr. VI lze dopočítat, že při teplotě olejové náplně 60 °C by mohl transformátor pracovat 10613214 hodin, než by dosáhl uvedeného kritéria. Takto vysoká hodnota je způsobena skutečností, že byl olej stárnutý pouze tepelně. V transformátoru ovšem na izolační systém komplexně působí celá řada činitelů, kromě tepelného namáhání ještě např. namáhání elektrické či vlivy prostředí, na pevnou izolaci působí i namáhání mechanické. Vícefaktorové namáhání navíc způsobuje mnohem rychlejší stárnutí izolačního systému, než kdyby na izolaci působily jednotlivé faktory zvlášť. Výsledné stárnutí vícefaktorového namáhání totiž nebývá prostým součtem účinků jednotlivých faktorů, jelikož dochází k jejich vzájemné interakci, čímž se celková životnost izolačního systému ještě více zkracuje [2].

---

<sup>3</sup> Kritériální hodnota pro stroj na konci záruční doby, respektive na konci prvního roku provozu [41]

## Závěr

Tato diplomová práce byla vypracována s cílem sjednotit základní informace týkající se elektroizolačních kapalin a možností jejich diagnostiky. V úvodní části práce je uvedeno dělení kapalin dle původu na minerální, syntetické a rostlinné a dále jsou zde porovnány vybrané vlastnosti zástupců z jednotlivých skupin.

Jelikož během provozu každého elektrického zařízení plněného olejem dochází k postupné degradaci jeho izolačního systému, je nutné pochopit děje, které stárnutí způsobují, a mohli tak co nejvíce omezit jejich vliv a zvýšit tím spolehlivost celého izolačního systému. Proto jsou v práci zmíněny nejdůležitější degradační parametry izolačních kapalin, mezi které se řadí působení teploty, vlhkosti a oxidační stárnutí.

Abychom mohli posoudit aktuální stav oleje a tím i stupeň jeho zestárnutí, je nutné aplikovat celou řadu diagnostických metod, které nám umožňují charakterizovat jednotlivé vlastnosti oleje. Cílem diagnostiky je ověření, zda parametry oleje jsou v souladu s limitními hodnotami předepsanými v normách. Pravidelným prováděním diagnostických zkoušek provozovatel elektrického zařízení snižuje riziko případné poruchy či havárie, jelikož se při zjištění nadměrného zestárnutí může provést výměna nebo regenerace olejové náplně. V práci je popsán soubor základních diagnostických metod pro hodnocení stavu izolačních kapalin.

Předmětem experimentální části diplomové práce je sestavení životnostní křivky u předloženého regenerovaného minerálního oleje. Olej byl stárnut při teplotách 110 °C, 120 °C a 130 °C po doby uvedené v *Tab. 5*. Jako parametr citlivý na proces tepelného stárnutí byl vybrán ztrátový činitel, který byl předmětem měření. Jako kritériální hodnota ztrátového činitele byla vybrána hodnota z podnikové normy Profylaktika elektrických strojů netočivých společnosti ČEZ, a.s.. Výsledkem experimentu je životnostní křivka vyjadřující životnost měřeného oleje, respektive dobu do dosažení zvoleného kritéria při uvedených teplotách. Z výsledné regresní rovnice lze dopočítat životnost při libovolně zvolené teplotě. Změřená životnostní křivka rovněž potvrzuje Montsingerovo pravidlo, které říká, že každým zvýšením teploty oleje o 10 °C se zkracuje jeho životnost na polovinu.

## Seznam použité literatury

- [1] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vydání. Plzeň, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [2] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha : BEN, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. 2004. 106 s. Dostupné z: [http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/!SZZ\\_2010/Rozvodna\\_zarizeni.pdf](http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/!SZZ_2010/Rozvodna_zarizeni.pdf) ISBN EEN403.
- [4] TRNKA, P. a POLANSKÝ, R. Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír. *ElectroScope*. 2007 [cit. 2011-12-10]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c13.pdf>
- [5] ARTBAUER, Ján; ŠEDOVIČ, Juraj; ADAMEC, Vladimír. *Izolanty a izolácie*. 1. vydání. Bratislava : ALFA, 1969. 620 s.
- [6] ROUSE, T. O. Mineral insulating oil in transformers. In: *Electrical Insulation Magazine, IEEE*. 1998 [cit. 2011-12-10]. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=675572>
- [7] ESB Elektrické stroje a.s. Regenerace transformátorových a turbínových olejů. Brno. [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>
- [8] MESHKATODDINI, Mohammad. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil. Teheran, 2008 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://www.bookidoc.com/text-id/23a8a60bh32i0>. ISSN 1941-7020.
- [9] KOŠŤÁL, Josef. Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních. In: *Elektro*. 2007 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36487.pdf>

- [10] Regenerace transformátorových olejů. In REVOS, s.r.o., 2002 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://www.revos.cz/sluzby-pro-energetiku/transformatory/regenerace-transformatorovych-oleju>
- [11] ALUYOR, Emmanuel; ORI-JESU, Mudiakeoghene. Biodegradation of mineral oils – A review. Benin City, 2009 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://www.ajol.info/index.php/ajb/article/viewFile/59986/48255>.  
ISSN 1684–5315.
- [12] *Olejeservis.cz*, [cit. 2011-12-12]. MIDEL 7131. Dostupné z: <http://www.olejeservis.cz/e-shop-oleje-a-maziva/biologicke-oleje-a-kapaliny/midel-7131-transformatorovy-olej-nehorlavy-ekologicky>
- [13] *Olejservis.cz*, [cit. 2011-12-12]. Shell Diala D. Dostupné z: <http://www.olejservis.cz/shell-diala-d-209-l/d-74510/>
- [14] *Transmarineoil.com*, 2007 [cit. 2011-12-12]. Shell Diala Oil D - Technical Data Sheet. Dostupné z: [http://transmarineoil.com/\\_files/DIALAD.pdf](http://transmarineoil.com/_files/DIALAD.pdf)
- [15] TIMOSHKIN, I. V., et al. Dielectric Properties of Diala D, MIDEL 7131 and THESO Insulating Liquids. 2008 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4772913&tag=1>.
- [16] HEMMER, M.; BADENT, R.; SCHWAB, A. J. Electrical properties of rape-seed oil. Karlsruhe, 2002 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1048742>.
- [17] BORSI, H.; GOCKENBACH E. Properties of Ester Liquid Midel 7131 as an Alternative Liquid to Mineral Oil for Transformers. 2005 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1490104>
- [18] MIDEL 7131. M&I MATERIALS LTD. 12/2010 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z: [http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/MIDEL\\_7131\\_Dielectric\\_Insulating\\_Fluid\\_Overview.pdf](http://www.midel.com/uploads/midel/documents/technical/MIDEL_7131_Dielectric_Insulating_Fluid_Overview.pdf)

- [19] *Elpro - Energo s.r.o.*, [cit. 2012-02-10]. Midel 7131. Dostupné z:  
<http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/zakladni-popis/olej/>
- [20] BERTRAND, Y. a HOANG, L.C. Vegetal oils as substitute for mineral oils. 2003 [cit. 2012-02-12]. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1218460>
- [21] FANCHIN, A.J. a MARCHESAN, T.B. Natural ester fluid: The transformer design perspective. 2010 [cit. 2012-02-12]. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5762902>
- [22] SCHEJBAL, Václav. *Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*. Plzeň, 2007. Disertační práce. ZČU v Plzni.
- [23] ILYAS, S.M. Study on the Characteristics of Jatropha and Ricinus Seed Oils as Liquid Insulating Materials. 2006 [cit. 2012-02-20]. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4105394>
- [24] *Cooper power systems*. Envirotemp FR3 fluid. 2010 [cit. 2012-02-20]. Dostupné z: <http://www.nttworldwide.com/docs/fr3brochure.pdf>
- [25] HOSIER, I.L., GUUSHAA, A., WESTENBRINK, E.W., ROGERS, C., VAUGHAN, A.S. a SWINGLER, S.G. Aging of biodegradable oils and assessment of their suitability for high voltage applications. 2011 [cit. 2012-02-20]. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5931059>
- [26] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN, 2006. 1. vydání. ISBN 80-7300-189-6.
- [27] KUBALÍK J. Perspektivy v oblasti kapalných izolantů. 2007 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z:  
<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>
- [28] *ELDIAG, s.r.o.* Elektrotechnická diagnostika. 5/1999 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: [http://www.eldiag.cz/texty/diag\\_metody.html](http://www.eldiag.cz/texty/diag_metody.html)

- [29] Pycnometer. *About.com: Chemistry*. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://chemistry.about.com/od/chemistrylabexperiments/ig/Chemistry-Laboratory-Glassware/Pycnometer.htm>
- [30] *Himalaya CO., Limited*. Oil dielectric test set. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.himalaya.com.cn/Applications.asp?partid=405&smallid=425>
- [31] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. 2010 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [32] *VERKON s.r.o.* Analyzátor bodu vzplanutí Pensky-Martens. [cit. 2012-03-13]. Dostupné z: <http://www.verkon.cz/data/catalog/big/img1841.jpg>
- [33] *MERCI s.r.o.* Titrátor TitroLine Easy. [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://eshop.merci.cz/detail19844/titratory/titrator-titroline-easy>
- [34] MENTLÍK, Václav a Radek POLANSKÝ. Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky. *Elektro*. 2008, číslo 05 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37214.pdf>
- [35] TRCHOVÁ, Miroslava. Jak vibrují atomy v molekulách. *Otevřená věda*. 2006 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://archiv.otevrenaveda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/15.pdf>
- [36] TIMOSHKIN, I. V.; GIVEN, M. J.; WILSON, M. P.; MACGREGOR, S. J. Review of dielectric behaviour of insulating liquids. In: *Universities Power Engineering Conference*. 2009 [cit. 2012-03-22]. ISBN 978-1-4244-6823-2. Dostupné z: Universities Power Engineering Conference
- [37] BADENT, R.; KIST, K.; RUGGEMEIER, B.; ZIERHUT, W.; SCHWAB, A. J. Dielectric characteristics of rape-seed oil. In: *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 1998 [cit. 2012-03-22]. ISBN 0-7803-5035-9.
- [38] BARBORKA, Vít. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. In *Elektro*. 2002, č. 07 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25085](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085)



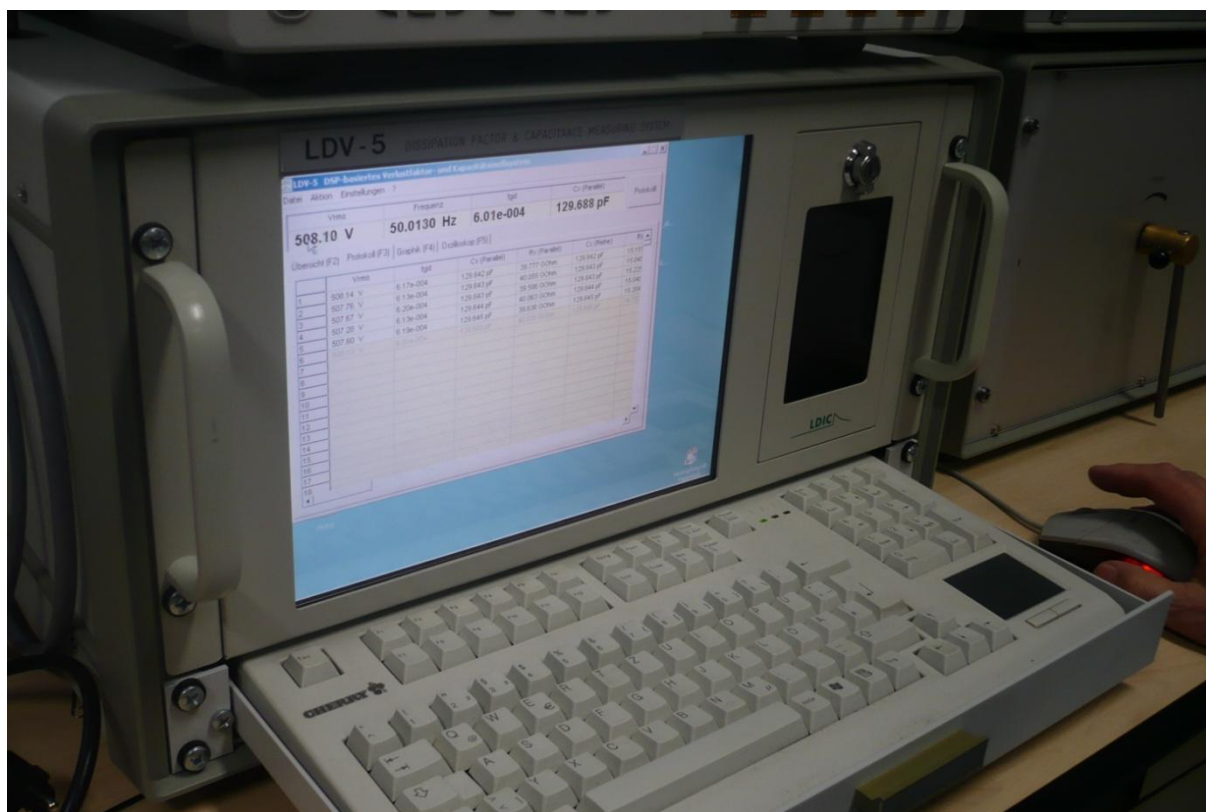
- [39] POLANSKÝ, Radek. Tepelné stárnutí elektroizolačních kapalin. *Elektrorevue*. 2008 [cit. 2012-04-09]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: [www.elektrorevue.cz/cz/download/tepelne-starnuti-elektroizolacnich-kapalin/](http://www.elektrorevue.cz/cz/download/tepelne-starnuti-elektroizolacnich-kapalin/)
- [40] Podniková norma ČEZ, a.s. *Profylaktika minerálních izolačních olejů*. Evidenční číslo 00/08 rev0.
- [41] Podniková norma ČEZ, a.s. *Profylaktika elektrických strojů netočivých – výkonové transformátory*. Evidenční číslo 00/05.
- [42] BARBORKA, Vít. Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátorů. *ELEKTRO*. 2002, č. 07 [cit. 2012-04-17] Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25085](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085)
- [43] Technická směrnice č. 21 - 2009. *Ministerstvo životního prostředí*. Praha, 2009 [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: [http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/MZPMSFHMV9DV/\\$FILE/212009.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/MZPMSFHMV9DV/$FILE/212009.pdf)
- [44] ČSN EN 60247. *Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele (tan delta) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Český normalizační institut, 2004.
- [45] ČSN EN 60216-1. *Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti. Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky*. Český normalizační institut, 2001.
- [46] TICHELMAN, B. Transformer Asset Management - A New Paradigm. 2004 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.bplglobal.net/eng/knowledge-center/download.aspx?id=174>
- [47] WILHELM, H. M., L. TULIO, R. JASINSKI a G. ALMEIDA. Aging Markers for In-service Natural Ester-based Insulating Fluids. 2011 [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05931057>

## Přílohy

**Příloha A** – Srovnávací tabulka vybraných vlastností zástupců z různých skupin izolačních kapalin

	<b>Shell Diala D</b>	<b>Midel 7131</b>	<b>Envirotemp FR3</b>
<b>Hustota</b> (kg.m <sup>-3</sup> ) při 20 °C při 25 °C	881 -	970 -	- 920
<b>Kinematická viskozita</b> (mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ) při 20 °C při 40 °C při -30 °C při -20 °C	17,3 - 730 -	- 28 - 1400	- 33 - -
<b>Bod vzplanutí</b> (°C)	138	260	330
<b>Bod tuhnutí</b> (°C)	-60	-60	-21
<b>Průrazné napětí</b> kV.(2,5 mm) <sup>-1</sup>	>70	>75	47
<b>Ztrátový činitel</b> [-] při 25 °C při 90 °C	- 0,001	- <0,008	0,0005 -
<b>Celková kyselost</b> (mg KOH).g <sup>-1</sup>	0,23	0,01	0,022
<b>Kaly</b> (% hm.)	0,1	<0,01	-

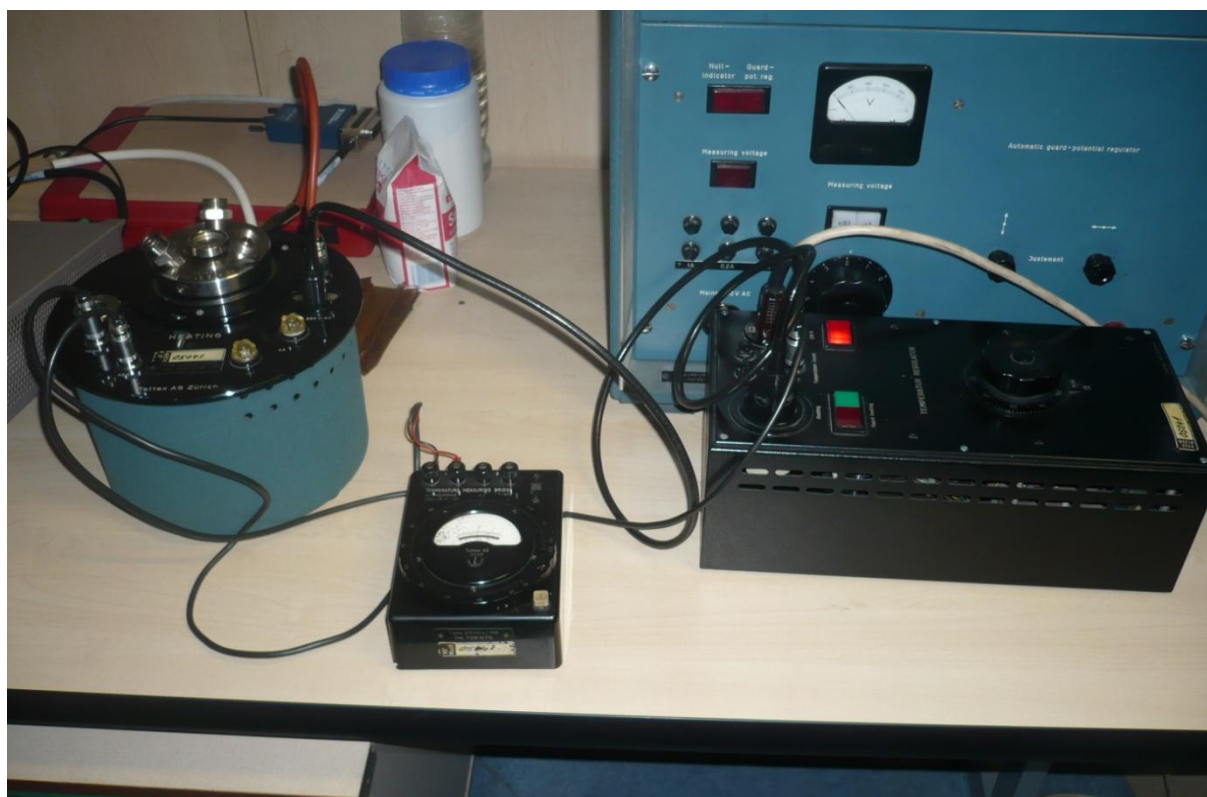
## Příloha B – Praktická část



Obr. I + Obr. II – Poloautomatický měřicí systém LDIC LDV-5

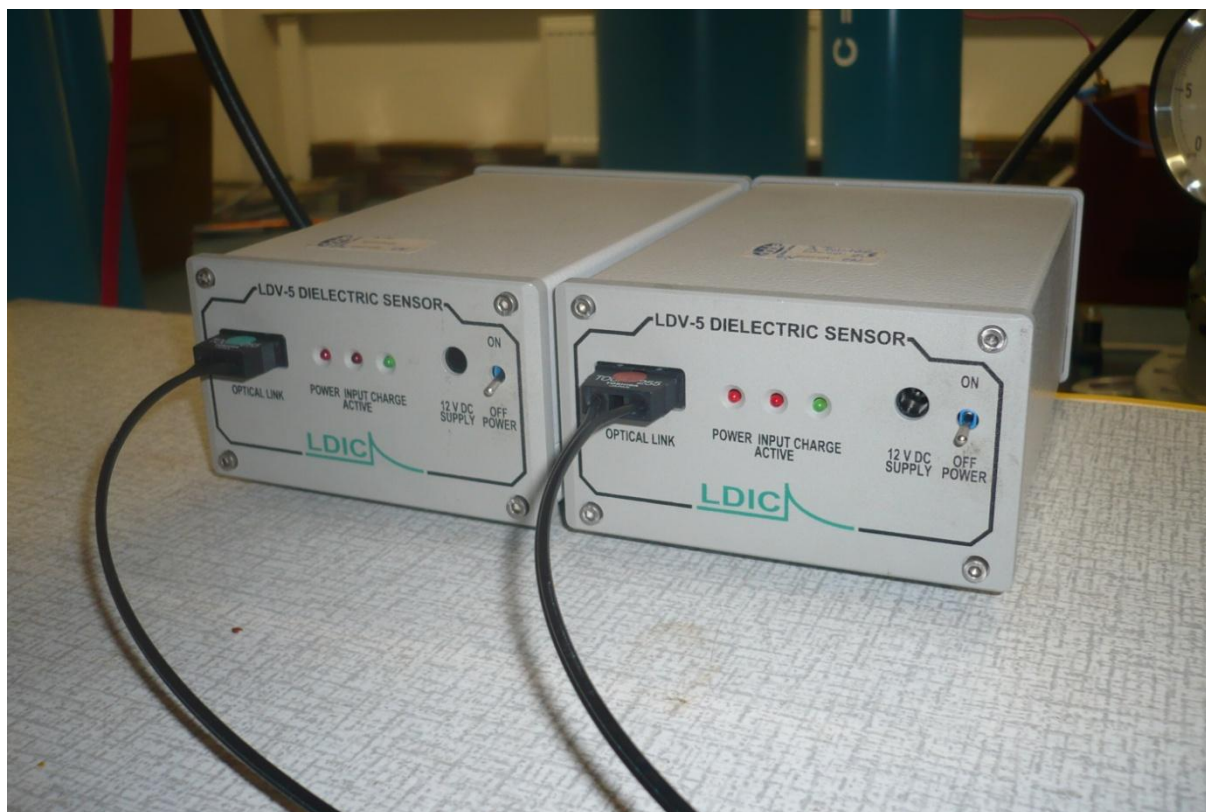


**Obr. III** – Vysokonapěťový zdroj HIGH VOLT (moduly SM 4 a LM 30)

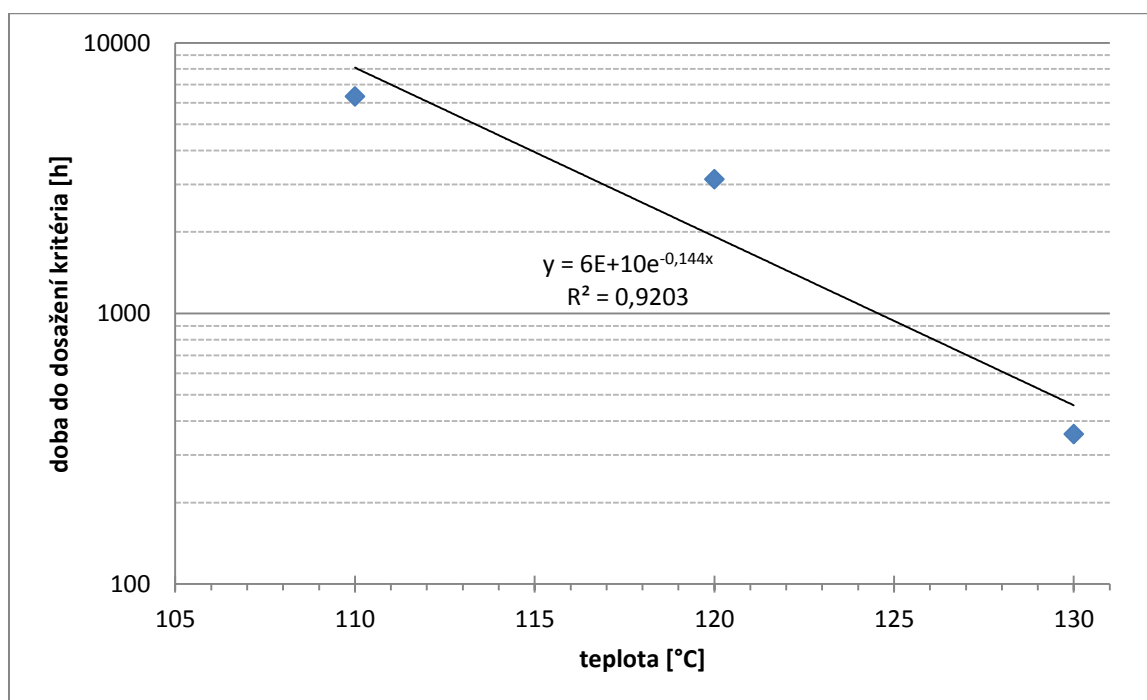


**Obr. IV** – Měřící cela TETTEX 2903/RR (vlevo), teplotní měřící můstek TETTEX 2105c/RR (uprostřed) a teplotní regulátor TETTEX 2965/SS (vpravo)





Obr. V – Senzory LDIC LDV-5



Obr. VI - Životnostní křivka regenerovaného transformátorového oleje stárnutého při teplotách 110, 120 a 130 °C při kritériu  $\text{tg}\delta_{90} = 0,06$

Tab. I - Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  oleje stárnutého při 110 °C

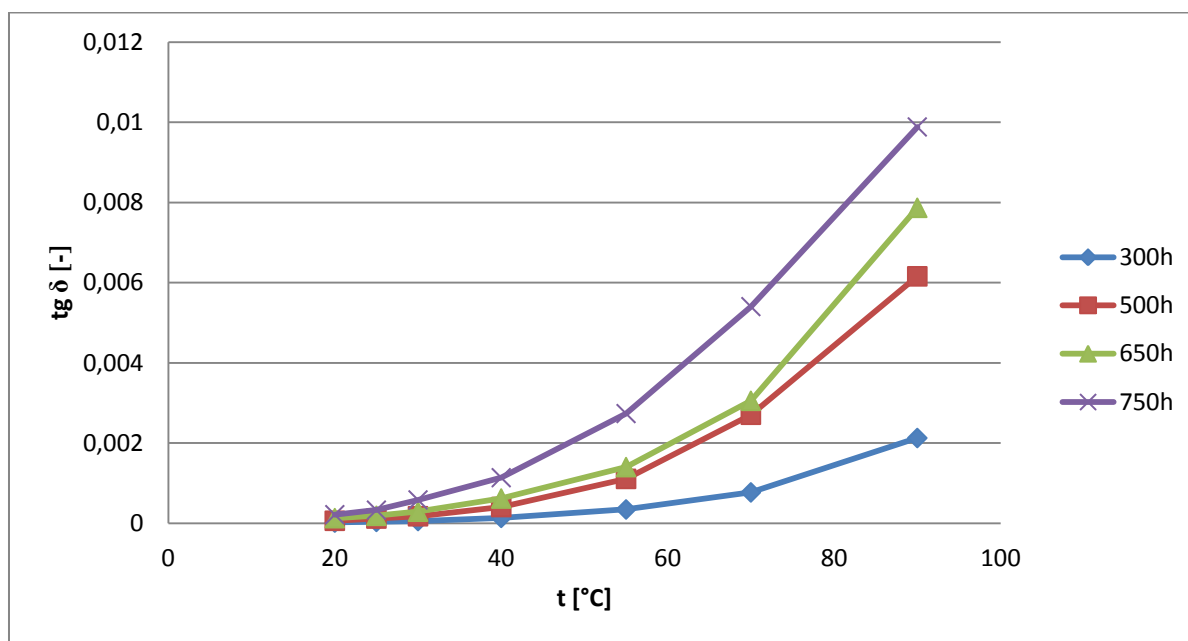
		t [°C]									
		20	25	30	40	55	70	90			
doba stárnutí [h]	500	1,29E-04	1,50E-04	2,12E-04	3,78E-04	5,97E-04	1,22E-03	2,47E-03			
	1000	9,78E-05	1,51E-04	2,26E-04	4,26E-04	9,85E-04	2,11E-03	5,70E-03			
	1250	1,20E-04	1,73E-04	2,71E-04	6,17E-04	1,41E-03	3,31E-03	7,90E-03			
	1500	2,54E-04	3,69E-04	5,36E-04	1,02E-03	2,27E-03	5,34E-03	1,32E-02			

Tab. II - Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  oleje stárnutého při 120 °C

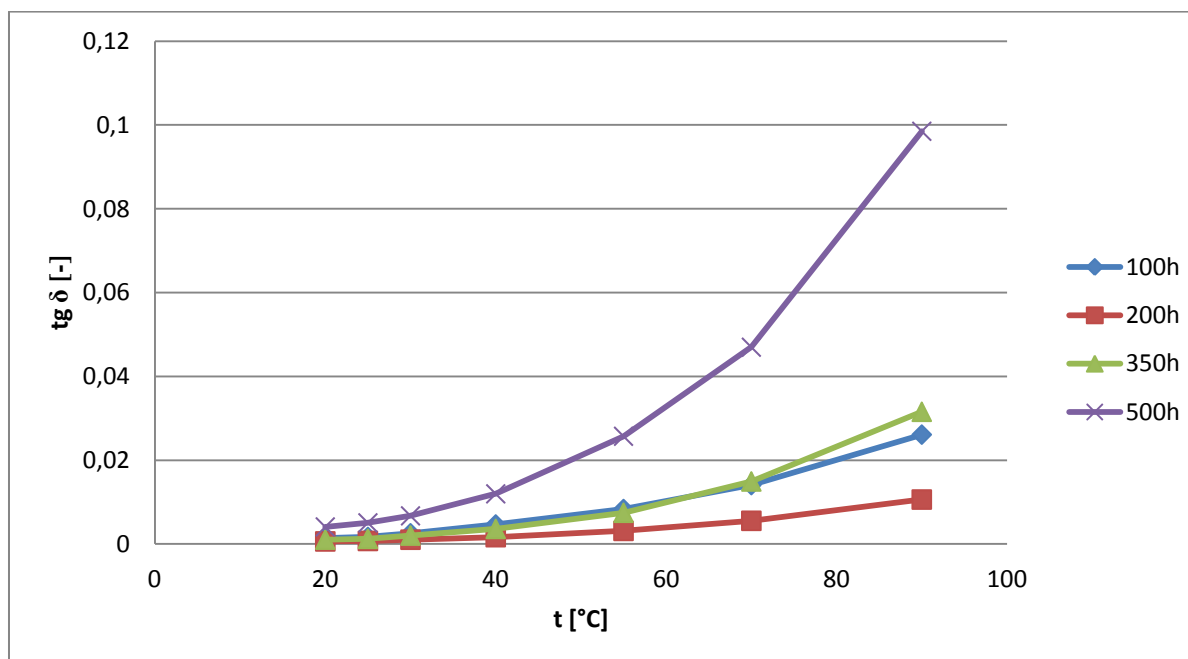
		t [°C]									
		20	25	30	40	55	70	90			
doba stárnutí [h]	300	2,05E-05	3,70E-05	5,82E-05	1,37E-04	3,47E-04	7,72E-04	2,13E-03			
	500	6,52E-05	1,21E-04	1,78E-04	4,08E-04	1,11E-03	2,71E-03	6,16E-03			
	650	1,31E-04	1,90E-04	2,91E-04	6,20E-04	1,40E-03	3,06E-03	7,87E-03			
	750	2,18E-04	3,31E-04	5,85E-04	1,14E-03	2,74E-03	5,40E-03	9,88E-03			

Tab. III - Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  oleje stárnutého při 130 °C

		t [°C]									
		20	25	30	40	55	70	90			
doba stárnutí [h]	100	1,41E-03	1,70E-03	2,58E-03	4,67E-03	8,36E-03	1,41E-02	2,61E-02			
	200	6,34E-04	7,50E-04	1,04E-03	1,65E-03	3,15E-03	5,55E-03	1,06E-02			
	350	1,06E-03	1,26E-03	2,03E-03	3,63E-03	7,48E-03	1,49E-02	3,16E-02			
	500	4,10E-03	5,07E-03	6,74E-03	1,20E-02	2,57E-02	4,70E-02	9,85E-02			



**Obr. VII** - Závislost ztrátového činitele na teplotě (olej stárnutý při 120 °C)



**Obr. VIII** - Závislost ztrátového činitele na teplotě (olej stárnutý při 130 °C)