

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Diagnostika stavu elektroizolačních struktur**

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela PAŠKOVÁ**  
Osobní číslo: **E13N0023P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika stavu 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. Popište typy používaných elektroizolačních systémů používaných ve vn technice
2. Popište degradační mechanismy probíhající v EIS typu olej-papír
3. Určete vhodné diagnostické parametry pro sledování stavu EIS
4. Provedte experiment zrychleného stárnutí EIS a jeho vyhodnocení

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. Jirí Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku elektroizolačního systému transformátoru. Souhrnně popisuje obecné rozdělení dielektrik dle skupenství pro VN techniku s následným zaměřením na systém olej-papír. Dále popisuje jednotlivé způsoby degradace elektroizolačního systému transformátoru a definuje diagnostické parametry. Tyto teoretické informace jsou doplněny experimentálním měřením zrychleného tepelného stárnutí alternativních izolačních kapalin, které by se mohly v budoucnu využívat v EIS transformátorů. Vše je doplněno o zhodnocení stávající situace a možné vize jakým směrem by se měly ubírat inovace izolačních olejů pro transformátory.

## **Klíčová slova**

Transformátor, systém olej-papír, degradace, alternativní elektroizolační kapaliny, zrychlené tepelné stárnutí

## **Abstract**

This master's thesis is focused on the problem of electrical insulating system of transformers. In summary it is described the general overview of dielectrics according to state for use in the high-voltage engineering. Then it focuses mainly on paper-oil system. It also describes the different methods of degradation of electrical insulating transformer system and defines the diagnostic parameters. This theoretical information is supplemented by experiment. Experiment present accelerated thermal aging of samples of alternative insulating fluids that could be used in the future in transformers. In conclusion, the current situation is evaluated and possible vision of what direction could be take innovation insulating oils for transformers.

## **Key words**

Transformer, paper-oil system, degradation, alternative insulating liquids, accelerated thermal aging

## **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.

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2015

Michaela Pašková

## **Poděkování**

Dovoluji si touto cestou poděkovat vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, které mi při vypracování mé práce poskytl. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jakubovi Součkovi a Jaroslavovi Bartoňovi za pomoc a dohled při realizaci experimentální části práce.

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....                                    | <b>12</b> |
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>1 ELEKTROIZOLAČNÍ SYSTÉMY PRO VN TECHNIKU</b> .....                   | <b>14</b> |
| 1.1 PLYNNÉ IZOLANTY .....  | 14        |
| 1.1.1 Vzduch .....   | 16        |
| 1.1.2 Fluorid sírový .....   | 17        |
| 1.2 KAPALNÉ IZOLANTY .....   | 18        |
| 1.2.1 Elektroizolační oleje .....  | 18        |
| 1.3 PEVNÉ IZOLANTY .....   | 24        |
| 1.3.1 Syntetické plastické hmoty .....                                   | 24        |
| 1.3.2 Sklo .....   | 25        |
| 1.3.3 Keramika .....   | 26        |
| 1.3.4 Slída .....  | 26        |
| 1.3.5 Celulóza .....   | 27        |
| 1.3.6 Kompozitní materiály pro točivé stroje .....                       | 29        |
| <b>2 DEGRADAČNÍ MECHANISMY EIS OLEJ-PAPÍR</b> .....                      | <b>32</b> |
| 2.1 TEPELNÁ DEGRADACE .....  | 33        |
| 2.2 ELEKTRICKÁ DEGRADACE .....   | 37        |
| 2.3 CHEMICKO-TEPELNÁ DEGRADACE .....                                     | 39        |
| <b>3 DIAGNOSTICKÉ PARAMETRY PRO SLEDOVÁNÍ STAVU EIS OLEJ-PAPÍR</b> ..... | <b>44</b> |
| 3.1 STUPEŇ POLYMERACE .....  | 44        |
| 3.2 ANALÝZA ROZPUŠTĚNÝCH PLYNŮ .....                                     | 45        |
| 3.3 OBSAH VODY V OLEJI - VLHKOST .....                                   | 46        |
| 3.4 FURANY .....   | 47        |
| 3.5 IZOLAČNÍ ODPOR .....   | 48        |
| 3.6 VNITŘNÍ REZISTIVITA .....  | 49        |
| 3.7 ČÍSLO KYSELOSTI .....  | 50        |
| 3.8 ZTRÁTOVÝ ČINITEL A RELATIVNÍ PERMITIVITA .....                       | 51        |
| 3.9 ELEKTRICKÁ PEVNOST A PRŮRAZNÉ NAPĚTÍ .....                           | 52        |
| 3.10 VIZKOZITA .....   | 53        |
| 3.11 BOD TUHNUTÍ A BOD VZPLANUTÍ .....                                   | 54        |
| 3.12 OXIDAČNÍ STABILITA A OBSAH INHIBITORŮ .....                         | 55        |
| 3.13 BIODEGRADABILITA .....  | 56        |
| 3.14 MEZIPOVRCHOVÉ NAPĚTÍ .....  | 56        |
| 3.15 DALŠÍ PARAMETRY .....   | 57        |
| <b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....                                       | <b>58</b> |
| 4.1 MĚŘICÍ METODY .....  | 59        |
| 4.1.1 Měření ztrátového činitele .....                                   | 60        |
| 4.1.2 Elektroodový systém .....  | 62        |
| 4.1.3 Měření přeskokového napětí .....                                   | 62        |
| 4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....  | 64        |
| 4.2.1 Ztrátový činitel .....   | 64        |



|  |                            |           |
|--|----------------------------|-----------|
| 4.2.2  | Relativní permitivita..... | 66        |
| 4.2.3  | Vnitřní rezistivita .....  | 68        |
| <b>ZÁVĚR .....</b>                                   |                            | <b>71</b> |
| <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b> |                            | <b>73</b> |
| <b>PŘÍLOHA.....</b>                                  |                            | <b>1</b>  |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| OBR. 1.1 ROZDĚLENÍ DIELEKTRIK A IZOLANTŮ (PŘEKRESLENO Z [2]).....   | 14 |
| OBR. 1.2 ÚPLNÁ VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PLYNNÉHO IZOLANTU (PŘEKRESLENO Z [2]).....                          | 15 |
| OBR. 1.3 PASCHENOVA KŘIVKA (PŘEKRESLENO Z [2]).....   | 16 |
| OBR. 1.4 STOŽÁR VENKOVNÍHO VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY .....  | 17 |
| OBR. 1.5 CHEMICKÁ STRUKTURA UHLOVODÍKŮ (PŘEKRESLENO Z [18]) .....   | 20 |
| OBR. 1.6 KERAMICKÉ IZOLÁTORY (PŘEVZATO Z [20]) .....  | 26 |
| OBR. 1.7 MOLEKULY CELULÓZY (PŘEKRESLENO Z [23]).....  | 28 |
| OBR. 1.8 PAPIROVÉ KOMPONENTY PRO VÝROBU TRANSFORMÁTORU (PŘEVZATO Z [23]) .....                                  | 29 |
| OBR. 2.1 VÝSLEDKY ANALÝZY – PŘÍČINY PORUCH TRANSFORMÁTORU (PŘEVZATO Z [28]).....                                | 32 |
| OBR. 2.2 VÝSLEDKY ANALÝZY – DRUHY PORUCH TRANSFORMÁTORU (PŘEVZATO Z [28]).....                                  | 33 |
| OBR. 2.3 PRŮBĚH TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA VÝŠCE TRANSFORMÁTORU A ROZLOŽENÍ TEPLoty (PŘEKRESLENO Z [29], [8])..... | 35 |
| OBR. 2.4 KYSELÁ HYDROLÝZA CELULÓZY (PŘEKRESLENO Z [41]).....  | 40 |
| OBR. 2.5 OXIDACE (PŘEKRESLENO Z [38]).....  | 42 |
| OBR. 2.6 CHEMICKÉ POPSÁNÍ SLOŽENÍ EIS TRANSFORMÁTORU PŘI PROCESU STÁRNUTÍ (PŘEKRESLENO Z [8]) .....             | 43 |
| OBR. 3.1 DUVALŮV TROJÚHELNÍK (PŘEKRESLENO Z [52]) .....   | 46 |
| OBR. 3.2 SLOUČENINY FURANU, KTERÉ JSOU DETEKOVÁNY V OLEJI TRANSFORMÁTORU (PŘEKRESLENO Z [54]) ..                | 47 |
| OBR. 3.3 STAV PAPIROVÉ IZOLACE V HAVARIJNÍM STAVU (PŘEVZATO Z [56]).....  | 48 |
| OBR. 3.4 ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ PEVNOSTI NA OBSAHU VODY V OLEJI (PŘEKRESLENO Z [29]).....                         | 52 |
| OBR. 4.1 USKLADNĚNÍ ZKOUMANÝCH OLEJŮ .....  | 59 |
| OBR. 4.2 SCHERINGŮV MŮSTEK (PŘEKRESLENO Z [29]) .....   | 60 |
| OBR. 4.3 HODNOTY ZTRÁTOVÉHO V ZÁVISLOSTI NA TEPLotĚ PRO DODANÝ STAV OLEJŮ .....                                 | 61 |
| OBR. 4.4 ELEKTRODOVÝ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ KAPALIN.....   | 62 |
| OBR. 4.5 ELEKTRODOVÝ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ KAPALIN (PŘEKRESLENO Z [64]) .....                   | 63 |
| OBR. 4.6 PRŮMĚRNÉ HODNOTY PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ U OLEJŮ V DODANÉM STAVU .....                                     | 64 |
| OBR. 4.7 ČASOVÁ ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO ČINITELE PŘI 90 °C .....   | 65 |
| OBR. 4.8 TEPLotNÍ ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO ČINITELE PŘI 0 HODINÁCH TEPELNÉHO STÁRNUTÍ.....                          | 66 |
| OBR. 4.9 TEPLotNÍ ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO ČINITELE PŘI 1056 HODINÁCH TEPELNÉHO STÁRNUTÍ.....                       | 66 |
| OBR. 4.10 ČASOVÁ ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY PŘI 90 °C.....   | 67 |
| OBR. 4.11 TEPLotNÍ ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY PŘI 0 HODINÁCH TEPELNÉHO STÁRNUTÍ .....                      | 68 |
| OBR. 4.12 TEPLotNÍ ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY PŘI 1056 HODINÁCH TEPELNÉHO STÁRNUTÍ .....                   | 68 |
| OBR. 4.13 ČASOVÁ ZÁVISLOST VNITŘNÍ REZISTIVITY PŘI 90 °C .....  | 69 |
| OBR. 4.14 TEPLotNÍ ZÁVISLOST VNITŘNÍ REZISTIVITY PŘI 0 HODINÁCH TEPELNÉHO STÁRNUTÍ .....                        | 70 |
| OBR. 4.15 TEPLotNÍ ZÁVISLOST VNITŘNÍ REZISTIVITY PŘI 1056 HODINÁCH TEPELNÉHO STÁRNUTÍ.....                      | 70 |

## SEZNAM TABULEK

|   |    |
|---|----|
| TAB. 1 RELATIVNÍ PERMITIVITA, PRŮMĚR MOLEKUL A DIPÓLOVÝ MOMENT VYBRANÝCH PLYNŮ [1].....                         | 15 |
| TAB. 2: ELEKTRICKÁ PEVNOST PLYNŮ A TEPLOTA ZKAPALNĚNÍ [1].....  | 16 |
| TAB. 3: VLASTNOSTI VZDUCHU PŘI NORMÁL. PODMÍNKÁCH, TEPLOTĚ 20 °C, VLHKOSTI 50 % A TLAKU 10 <sup>5</sup> [1].... | 17 |
| TAB. 4: DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH KAPALNÝCH IZOLANTŮ [1] .....  | 18 |
| TAB. 5: CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH SYNTETICKÝCH KAPALNÝCH IZOLANTŮ [1].....                          | 22 |
| TAB. 6: VYBRANÉ PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ OLEJŮ [25, 26, 27] .....   | 24 |
| TAB. 7 VYBRANÉ VLASTNOSTI VYBRANÝCH TERMOPLASTŮ .....   | 25 |
| TAB. 8 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI SLÍDY [1] .....  | 27 |
| TAB. 9 DIAGNOSTICKÉ METODY ON/OFF-LINE [8] .....  | 44 |
| TAB. 10 SOUVISLOST HODNOT OBSAHU FURANU A DPP NA ŽIVOTNOST EIS [56].....  | 48 |
| TAB. 11 MEZNÍ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO Činitele DLE NORMY ČSN EN 60422.....   | 64 |

## Seznam symbolů a zkratek

|                               |       |  |
|-------------------------------|-------|--|
| EIS                           | ..... | elektroizolační systém                       |
| VN                            | ..... | vysoké napětí                                |
| $U_p$ [kV]                    | ..... | průrazné napětí                              |
| $p_d$ [Pa.m]                  | ..... | tlak v závislosti na vzdálenosti od elektrod |
| $\epsilon_r$ [-]              | ..... | relativní permitivita                        |
| $SF_6$                        | ..... | fluorid sírový                               |
| $\delta$ [kg/m <sup>3</sup> ] | ..... | měrná hustota                                |
| $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]   | ..... | měrný odpor, rezistivita                     |
| $\sigma$ [S/m]                | ..... | konduktivita                                 |
| $\vartheta_t$ [°C]            | ..... | teplota tuhnutí                              |
| $\vartheta_v$ [°C]            | ..... | teplota vzplanutí                            |
| $tg\delta$ [-]                | ..... | ztrátový činitel                             |
| $E_p$ [kV.cm <sup>-1</sup> ]  | ..... | elektrická pevnost                           |
| RR                            | ..... | Resin Rich                                   |
| VPI                           | ..... | Vacuum pressure impregnation                 |
| PEN                           | ..... | Polyetylén naftalát                          |
| PET                           | ..... | Polyethylentereftalát                        |
| VIW                           | ..... | Vacuum Impregnated Winding Method            |
| VIB                           | ..... | Vacuum Impregnated Bar Methode               |

## Úvod

Elektroizolační systém je jedním z nejdůležitějších prvků celého elektrického zařízení. Ať už se jedná o točivý či netočivý stroj. Správná funkčnost a technologické zpracování jednotlivých materiálů, které tvoří výsledný EIS, se řadí mezi podstatná hlediska pro dlouhou životnost a bezporuchový stav zařízení.

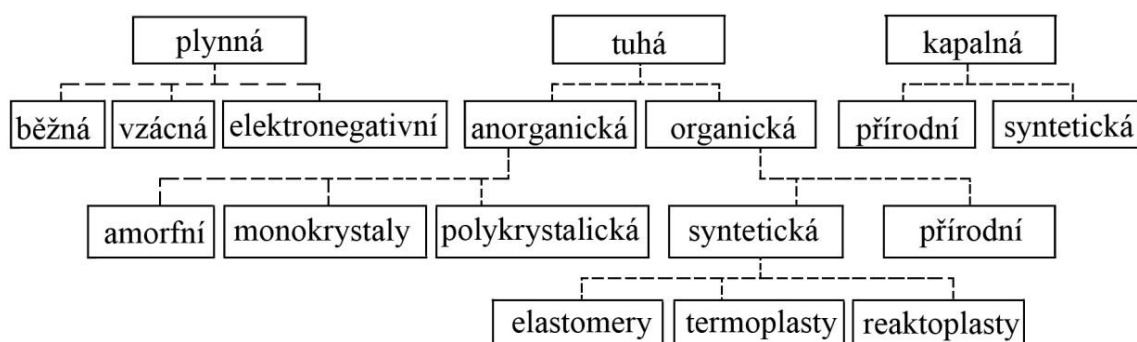
V současné době se hledají nové směry v oblasti definice materiálů. Zejména u výkonových transformátorů, ve kterých se uplatňuje EIS olej-papír. Zatím jsou nejrozšířenější minerální oleje, které pochází z neobnovitelných zdrojů, a proto se hledá alternativa. Ta je zaměřena na dostupné, obnovitelné a biologicky odbouratelné oleje nezatěžující životní prostředí. Konkrétně se jedná o oblast rostlinných olejů, syntetických a přírodních olejů na bázi organických esterů.

Mezi cíle této práce patří vytvoření přehledu používaných materiálů pro EIS ve VN technice, se zaměřením na systém olej-papír. Dále popsat proces degradace pro systém olej-papír a faktory, které životnost EIS transformátoru ovlivňují. A následná realizace experimentálního měření zrychleného tepelného stárnutí pro rostlinné oleje a syntetické oleje na bázi organických esterů.

Tato diplomová práce je rozložena do čtyř základních kapitol. První kapitola se zabývá rozdělením elektroizolačních materiálů pro VN techniku podle skupenství, kdy je nejvíce zaměřena na složky EIS transformátoru. V druhé kapitole jsou shrnuty degradační mechanismy jednotlivých složek systému olej-papír dle původce degradace. Třetí kapitola popisuje vhodné diagnostické parametry pro sledování stavu elektroizolačního systému transformátoru, které jsou popsány v příslušných normách. V poslední čtvrté kapitole této práce je popsáno experimentální měření zrychleného tepelného stárnutí olejů. Závěr této práce tvoří zhodnocení získaných výsledků v návaznosti na sumarizaci stávajícího stavu využívaných olejů pro transformátory s popisem možného budoucího vývoje v této oblasti a možných úprav norem v důsledku rychlého vývoje nových elektroizolačních kapalin.

# 1 Elektroizolační systémy pro VN techniku

Za elektroizolant je považována látka, která vykazuje izolační vlastnosti. Tyto izolační vlastnosti může vykazovat i dielektrikum jelikož každý izolant je dielektrikem, ovšem ne každé dielektrikum je izolantem. Jinými slovy izolant je takové dielektrikum, které je upraveno do takového stavu, že zamezuje průchodu elektrickému proudu. V elektrotechnice se lze většinou setkat s elektroizolačními systémy, které jsou tvořeny větším počtem materiálů, jež vykazují elektroizolační vlastnosti. Jedním z možných dělení elektroizolačních materiálů, určených pro VN techniku, je podle skupenství na plynné, kapalné a pevné. Toto rozdělení je uvedeno v následujících kapitolách. Detailní rozdělení je zobrazeno na obr. 1.1. Všechny tyto skupenství mají své uplatnění. Hlavním parametrem izolantů je jejich vysoký měrný odpor, díky němuž je možno oddělit dva různé potenciály. V současné době se realizují výzkumy na zlepšení vlastností izolantů. Výzkum se opírá o poznatky z praxe, kde jsou již jasně dané požadavky na izolační systémy. Aplikace nových materiálů pro izolanty je ovlivněna ekonomickým aspektem, dostupností materiálu a náročností použité technologie pro další zpracování.



Obr. 1.1 Rozdělení dielektrik a izolantů (překresleno z [2])

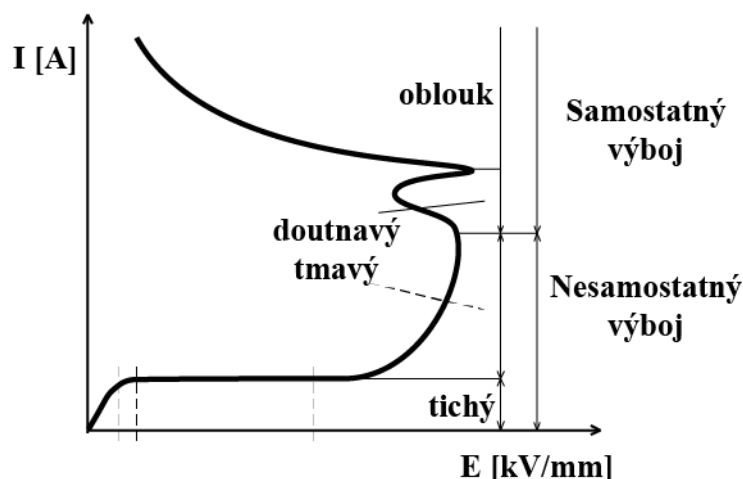
## 1.1 Plynné izolanty

Plynné izolanty mají v porovnání s jinými skupenstvími zanedbatelné ztráty, které se pohybují při frekvenci 50 Hz řádově  $10^{-8}$ . Dokonale vyplňují prostor. Proud může vzniknout, pokud jsou přítomné ionty. Následkem toho lze předpokládat vznik elektrického oblouku. Průrazná pevnost závisí na hustotě plynu. Pokud se při stálé teplotě zvýší tlak plynu, průraznost stoupá. Mezi další vlastnosti plynů patří např.: nízká permitivita, malá vodivost, stálost vlastností, schopnost regenerace a nepodléhají stárnutí [1]. Hodnoty relativní permitivity vybraných polárních a nepolárních plynů jsou uvedeny v tab. 1.

**Tab. 1 Relativní permitivita, průměr molekul a dipólový moment vybraných plynů [1]**

| nepolární plyny |                 |             | polární plyny |                 |                               |
|-----------------|-----------------|-------------|---------------|-----------------|-------------------------------|
| plyn            | $\epsilon_r(-)$ | $\phi (nm)$ | plyn          | $\epsilon_r(-)$ | $p \cdot 10^{-29}(C \cdot m)$ |
| $H_2$           | 1,00027         | 0,27        | $N_2O$        | 1,00114         | 0,39                          |
| $O_2$           | 1,00053         | 0,364       | $HCl$         | 1,003           | 1,35                          |
| $N_2$           | 1,00061         | 0,382       | $NH_3$        | 1,0072          | 1,47                          |
| $CH_4$          | 1,00095         | -           | $C_2H_5Cl$    | 1,0147          | -                             |

Vlastnosti plyných izolantů jsou znázorněny i na průběhu úplné voltampérové charakteristiky plynu obr. 1.2, která zobrazuje rovnováhu mezi počtem zanikajících a vznikajících nosičů nábojů. Dále je zde vidět i oblast samotného výboje, která se dále dělí podle svého vzniku na samostatný a nesamostatný. Nesamostatný výboj je charakterizován velmi nízkou hustotou proudu. Při následném zvýšení napění, přechází nesamostatný výboj do formy samostatného výboje, který je povětšinou provázen zářením plynu.



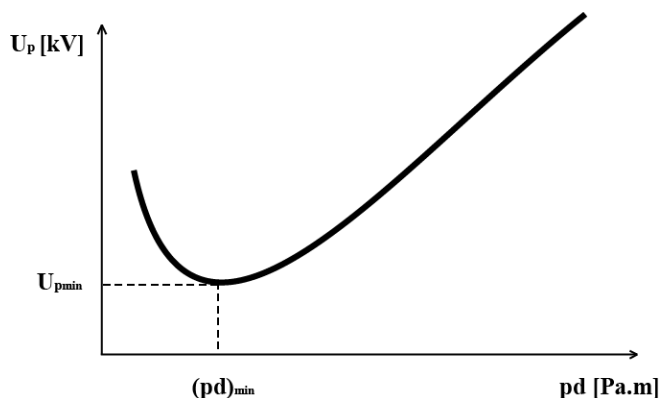
**Obr. 1.2 Úplná voltampérová charakteristika plyného izolantu (překresleno z [2])**

Výboje plynů lze rozdělit do dvou nejběžnějších případů stacionárního samostatného výboje a to na doutnavý a obloukový výboj. Doutnavý výboj byl popsán pomocí Paschenova zákona, který říká, že výška přeskokového napětí v plynu je silně závislá na tlaku plynu. Za předpokladu, že se jedná o homogenní elektrické pole a teplota plynu je konstantní. Tento zákon popisuje rovnice 1.1. Velikost přeskokového napětí je závislá na tlaku a vzdálenosti elektrod. Tohoto zákona je v praxi užíváno u zářivek. Grafické znázornění tohoto Paschenova zákona je na obr. 1.3. Dno sedla ( $U_{pmin}$  a  $pd_{min}$ ) se pro různé plyny liší. Tato hodnota vyjadřuje optimální podmínky pro výboj a to pro jeho vytvoření, ale i pro jeho udržení. V tab. 2 jsou dále uvedeny vybrané plyny a jejich porovnání elektrické pevnosti. [2]

$$U_p = f(p \cdot d) \tag{1.1}$$

**Tab. 2: Elektrická pevnost plynů a teplota zkapalnění [1]**

| plyn             | chemický vzorec | rel. elektrická pevnost | bod zkapalnění (°C) |
|------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|
| vzduch           | -               | 1,0                     | -192                |
| dusík            | $N_2$           | 1,0                     | -196                |
| vodík            | $H_2$           | 0,6                     | -253                |
| oxid uhličitý    | $CO_2$          | 0,9                     | -78,5               |
| hexafluorid síry | $SF_6$          | 2,3 – 2,5               | -63,8               |

**Obr. 1.3 Paschenova křivka (překresleno z [2])**

Ve VN technice se v elektroizolačních systémech uplatňují plyny jako je vodík, dusík a oxid uhličitý. **Vodík** má 14krát nižší hustotu a 7krát vyšší měrnou tepelnou vodivost než vzduch, díky tomu se využívá převážně jako chladicí médium u velkých točivých strojů. Další využití tohoto plynu je např. v elektrických pecích, kde tvoří umělou atmosféru. **Dusík** nemá oproti vzduchu oxidační účinky, jelikož neobsahuje kyslík. V důsledku této vlastnosti se používá jako inertní atmosféra, která chrání před oksylováním izolačních olejů v transformátorech. Využití dusíku pro VN techniku je zejména v suchých výkonových transformátorech, kde figuruje jako chladicí a izolační látka. **Oxid uhličitý** se používá např. pro vysokonapěťové kapacitní normály jako dielektrikum. Dále ve VN technice využíváme vzácné plyny v podobě inertních plynů. Jedná se především o **helium, neon, argon krypton** nebo **xenon**. V praxi se používají jako náplň do výbojek. Ve VN technice se v současné době používá nejčastěji **vzduch** a **fluorid sírový**, za který se hledají adekvátní náhrady. [1]

### 1.1.1 Vzduch

Mezi nepoužívanější plynné izolanty ve VN technice patří vzduch. Složení vzduchu je ze 78 % dusíku, z 21 % kyslíku. Zbylé procento tvoří plyny jako je argon, oxid uhličitý, neon, helium, vodík či ozon. Vzduch je považován za nejstarší a nejběžnější izolant. V největší míře se vzduchu používá jako izolant pro vytvoření izolačního prostředí v rámci rozvodných vedení. Dále se využívá ve vzduchových kondenzátorech a transformátorech [1]. Pro suché



transformátory, ve kterých je použit vzduch, je omezující parametr pracovní napětí, které je maximálně 38 kV a zároveň dimenzování výkonu do 10 MVA [2]. Pro vysokonapěťová zařízení musí být vzduch stlačen. Parametry vzduchu při teplotě 20 °C jsou zobrazeny v tab. 1.3.

**Tab. 3: Vlastnosti vzduchu při normál. podmínkách, teplotě 20 °C, vlhkosti 50 % a tlaku  $10^5$  [1]**

| měřená veličina                          | hodnota                    |
|--|----------------------------|
| měrná hustota $\delta$                   | 1,292 kg/m <sup>3</sup>    |
| poměrná permitivita $\varepsilon$        | 1,006                      |
| měrný odpor $\rho$                       | $10^{14}$ $\Omega \cdot m$ |
| činitel dielektrických ztrát $tg \delta$ | $10^{-6}$                  |
| konduktivita $\sigma$                    | $10^{-14}$ S/m             |
| měrné teplo při 0 °C                     | 1009 J/(kg ·K)             |
| měrné teplo při 100 °C                   | 1011 J/(kg · K)            |
| měrná tepelná vodivost při 0°C           | 0,024 W/(m·K)              |
| měrná tepelná vodivost při 100°C         | 0,031 W/(m·K)              |



**Obr. 1.4 Stožár venkovního vedení přenosové soustavy**

### 1.1.2 Fluorid sírový

V rámci VN techniky se dále ve velké míře využívá fluorid sírový SF<sub>6</sub>. Mezi vlastnosti tohoto plynu patří elektronegativita, bezbarvost, netoxičnost a je bez zápachu. Jeho elektrická pevnost je třikrát větší než u vzduchu. Má vysokou vypínací schopnost, která se v praxi projevuje tím, že v oblasti elektrického oblouku se rozkládá, zhasíná oblouk a ve zlomku sekundy opět regeneruje. Permitivita se blíží k jedné. Je chemicky netečný, při normální teplotě stálý. Díky tomu že je pětikrát těžší než vzduch, se stává nebezpečným pro lidské zdraví v uzavřených prostorech v důsledku vytlačení vzduchu. [2] Fluorid sírový se ve velké míře používá pro suché transformátory s pracovním napětím do 75 kV. Dále se tento plyn

používá v rozvaděčích. Díky svým dobrým spínacím vlastnostem, kdy se pracovní napětí pohybuje do 52 kV. V neposlední řadě se SF<sub>6</sub> používá pro zapouzdřené rozvodny. Emise tohoto plynu přispívají k růstu hrozby skleníkových plynů a v rámci této skutečnosti se zkoumají jiné možnosti a jeho úplná náhrada [3].

## 1.2 Kapalně izolanty

Kapalně izolanty ve VN technice nemají jen izolační funkci. V důsledku své tepelné vodivosti se používají i jako chladicí média. Díky kapalnému skupenství je dokonale vyplněn prostor a zároveň je odváděno vzniklé teplo při provozu strojů. Dále usnadňují zhášení výbojů a odlehčují zatížení pevných izolantů. To vede k prodloužení životnosti izolace. [1]

Z hlediska původu se kapalně izolanty rozdělují na přírodní a syntetické kapaliny. Kapaliny přírodního původu se dále dělí na rostlinné a minerální. Kapaliny lze dělit na polární a nepolární kapaliny podle charakteru většiny molekul. [16]

### 1.2.1 Elektroizolační oleje

Oleje jsou jedním z nejstarších kapalných izolantů. Konkrétně minerální oleje na bázi ropy jsou v současné době jedním z nejlepších izolačních médií pro VN techniku. Ovšem tato komodita pochází z neobnovitelných zdrojů, a tak je potřeba její používání omezit. Případně minerální oleje jako takové úplně nahradit alternativami, které budou vykazovat stejné vlastnosti jako stávající minerální oleje na bázi ropy. V následující části jsou uvedeny možnosti, jak minerální oleje nahradit. Oleje, jako součást izolačního systému, se v největším měřítku používají především v transformátorech. Zde olej vystupuje jako izolační a zároveň i chladicí médium. Podle použití dělíme oleje na transformátorové, kabelové a kondenzátorové. V tab. 4 jsou uvedeny důležité parametry vybraných olejů.

Tab. 4: Dielektrické vlastnosti vybraných kapalných izolantů [1]

| olej                 | teplota tuhnutí    | teplota vzplanutí  | relativní permitivita      | ztrátový činitel         | elektrická pevnost             |         |
|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------|
|                      |                    |                    |                            |                          | nevysušen                      | vysušen |
|                      | $\vartheta_t$ (°C) | $\vartheta_v$ (°C) | $\epsilon_r$ (-) při 20 °C | $tg\delta$ (-) při 20 °C | $E_p$ (kV · cm <sup>-1</sup> ) |         |
| transformátorový BTA | ≤-45               | >130               | 2,1-2,4                    | ≤ 0,015                  | > 92                           | > 200   |
| transformátorový BTS | -40                | 135                | 2,1-2,4                    | 0,015                    | > 92                           | > 200   |
| kabelový vn          | ≤-8                | >220               | -                          | -                        | -                              |         |
| kondenzátorový       | ≤-40               | >130               | 2,1-2,25                   | <0,0012                  | >200                           |         |

### 1.2.1.1 Minerální oleje

Chemicky se minerální olej skládá z uhlovodíkových molekul. Ropa jako surovina je směsí nejen kapalných, ale také plynných a tuhých látek. Uhlovodíky jí tvoří z 97 %. Dále jsou v ropě obsaženy sloučeniny síry, kyslíku, dusíku a kovy obsaženy v organických a anorganických solích. Jsou zde obsaženy i rozpuštěné tuhé látky jako parafin. Mezi rozpuštěné plynné látky patří především ethan, butan, oxid uhličitý, dusík a vzácné plyny. Kapalně látky, tvořící značnou část ropy, jsou zastoupeny uhlovodíky, jako jsou n-alkany, izoalkany, cykloalkany, aromáty a alkeny. V neposlední řadě jsou obsaženy i různé sloučeniny obsahující heteroatomy (dusík, síra, kyslík). [4]

Získávání minerálního oleje pro VN techniku se provádí při postupném zpracování ropy po odstranění hrubých nečistot anorganických solí a vody, kdy se ropa podrobuje atmosférické destilaci. Při tomto procesu se odloučí benzínové, petrolejové a lehké olejové frakce. Zbývající mazut se pak dále destiluje ve vakuové věži při získání středních a těžkých olejů. Zbytek pak obsahuje nejtěžší olejové destiláty, vazelínu a asfalt. Lehký olej, který se získal destilací, se pak dále rafinuje za účelem neutralizace. V tomto momentu zpracování je zbaven polárních kyslíkatých sloučenin. Pokud je rafinace provedena chemicky, kdy je použita kyselina sírová, vzniká kal z této kyseliny a nečistoty v oleji, které se při této rafinaci odstraňují. Olej se dále neutralizuje a promývá. V případě vysoce rafinovaných elektroizolačních olejů se dále provádí selektivní rafinace rozpouštědly, kterými se rozpouští nežádoucí složky. Závěrem rafinace je práškování, tj. čištění oleje při 130 °C rozemletou bělící hlinkou, kterou se odstraní zbytky polárních látek a nečistot. Stabilita olejů za provozu je ohrožená oxidací, proto se oleje stabilizují inhibitory, ty působí jako antioxidanty. [5]

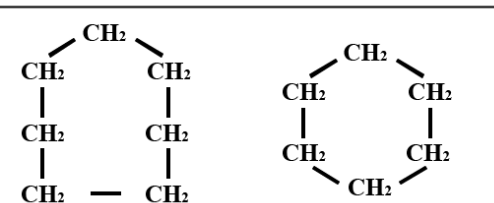
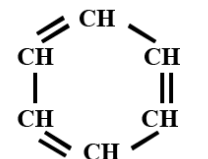
Minerální oleje jsou směsí různých uhlovodíků, které jsou obsaženy v ropě. Tyto uhlovodíky se od sebe liší svým uspořádáním, způsobem technologického zpracování ropy, ale i vlastnostmi výsledného minerálního oleje. Například přebytek parafinických molekul zvyšuje viskozitu a naopak nadbytek benzenových molekul viskozitu snižuje. Následně lze podle tohoto hlediska rozdělit minerální oleje do tří charakteristických skupin:

**Parafinické oleje**, obecný vzorec  $C_nH_{2n+2}$ , někdy lze najít i označení jako alkalické či metanové. Obsahují větší podíl parafinových uhlovodíků (více než 66 %), které jsou lineárními molekulami typu  $CH_3-CH_2-\dots-CH_2-CH_3$ . Jedná se o nasycené uhlovodíky

s rozvětvenými (izoalkany, izoparafíny) a nerozvětvenými (n-alkany, parafíny) řetězci. Mezi vlastnosti parafinických olejů patří chemická stálost, vysoký bod vzplanutí, dobrá viskozitní křivka, brzké tuhnutí při teplotách pohybujících se kolem 0 °C, menší permitivita a ztráty.

**Naftenické oleje**, obecný vzorec  $C_nH_{2n}$ , nebo také cyklanické oleje jsou tvořeny cyklickými nasycenými uhlovodíky, jejichž molekuly jsou tvořeny naftenovým jádrem bez dvojité vazby. Jsou chemicky méně stálé než parafíny, ale s nízkým bodem tuhnutí.

**Aromatické oleje**, obecný vzorec  $C_nH_{2n-6}$ , jsou charakteristické svým zápachem a tvoří uzavřenou molekulu se střídavě dvojitými vazbami mezi atomy uhlíku. Jsou zastoupeny v malém množství z důvodu jejich toxicity. [1, 4]

| Uhlovodíky               | Druh                        | Strukturní vzorce  |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| nasycené<br>uhlovodíky   | Parafinické<br>nerozvětvené | $\begin{array}{ccccccccc} & - & CH_2 & - & CH_2 & - & CH_2 & - & CH_2 & - & CH_2 & - & \\ & - & CH_2 & - & CH & - & CH_2 & - & CH_2 & - & CH & - & \\ & & & & & & & & & &   & & \\ & & & & & & & & & & - & CH_2 & - & CH & - & \\ & & & & & & & & & &   & & & & & \\ & & & & & & & & & & CH_3 & & & & & \end{array}$ |
|                          | Naftenické                  |    |
| nenasycené<br>uhlovodíky | Aromatické                  |    |

Obr. 1.5 Chemická struktura uhlovodíků (překresleno z [18])

Pro využití v elektroizolačních systémech se převážně využívají naftenické a parafinické oleje, které jsou tvořeny nasycenými uhlovodíky, a proto je olej stabilnější. Konkrétně pro elektroizolační systém transformátoru jsou vyžadovány i další vlastnosti oleje jako je nízká viskozita. Ta je vyžadována pro správnou impregnaci papírové izolace v transformátorech.

### 1.2.1.2 Syntetické izolační kapaliny

První typy syntetických izolačních kapalin se dostaly na trh v druhé polovině 20. století. Jejich výroba vycházela z poznatků automobilového průmyslu. Automobilový průmysl si žádal ekologicky nezávadný olej. Důvodem bylo zvýšené využívání automobilů, čímž

se zvyšovala i spotřeba motorových olejů. Na základě trendu průmyslu se dnes spotřebuje větší množství syntetických olejů pro automobilový průmysl nežli pro elektroizolační účely. Tyto syntetické kapaliny se vyznačují také dobrými chemickými vlastnostmi. Jsou nehořlavé a prakticky nestárnou. Podle složení můžeme tyto kapaliny dále dělit na:

**Polybutyleny** vzniklé polymerací nenasyčených uhlovodíků. Při polymeraci nenasyčených uhlovodíků butylenu i propylénu vznikají syntetické tekutiny o různých hodnotách viskozity. Nejvíce používané polybutyleny, jako nepolární látky, vynikají stabilitou i při vysokých teplotách. Mají dobré elektrické vlastnosti, nízké dielektrické ztráty a velký měrný odpor. Jsou odolné proti záření a oxidaci.

**Silikonové kapaliny** jsou bezbarvé, hydrofobní a ekologicky nezávadné. Někdy se označují jako polydimetylsiloxany. Významnou vlastností silikonových kapalin je jejich tepelná stálost, vysoký bod zápalu do 350 °C, poměrně dobré izolační vlastnosti a chemická inertnost. Při zápalu se tolik neohřívají. Nezpůsobují korozi kovů a nejsou agresivní vůči organickým izolantům. Jejich použití je proto vhodné u zařízení, kde se zvyšuje pravděpodobnost požáru. V praxi se jedná především o distribuční transformátory. [5]

**Chlorované uhlovodíky** se mohou vyrobit substitucí atomu vodíku chlorem. Z chlorovaných uhlovodíků, označovaných jako nehořlavé tekutiny, se používalo chlorovaných derivátů benzenu a bifenyly. Vlastnosti těchto hmot se mění stupněm jejich chlorování. Jsou nehořlavé a nevybušné. V ČR je znám tento typ kapaliny pod názvem Delor. Výroba chlorovaných uhlovodíků v průběhu 20. století dosahovala milionů tun nejrůznějších sloučenin. Až masové používání ukázalo, že jejich dlouhodobé působení je ekologicky závadné, a tak se již nesmí používat. [1]

**Fluorované kapaliny** jsou deriváty uhlíků, aminů a esterů, ve kterých jsou atomy vodíku nahrazeny atomy fluoru. Vzhledem k vyšším hodnotám bodů tuhnutí vzniká při vyšších teplotách větší tlak par těchto sloučenin a pro snadnou možnost vypařování je potřeba uzavírat prostory. Elektrickým průrazem vznikají kyseliny obsahující fluor a ty napadají izolační hmoty a kovy. Samotné fluorokarbonáty jsou velmi stálé až do teplot kolem 500 °C. Jsou-li suché, nenapadají kovy ani izolanty, avšak v přítomnosti vlhkosti působí korozivně na železo a lehce i na hliník a měď. Lze je použít pro náplně transformátorů a pro dobré zhášecí účinky pro výkonné spínače. [6]

**Organické estery** jsou vyráběny chemickou syntézou a jejich struktura je uzavřena tak, aby byla odstraněna centra nestability. Některé jsou potom vhodné i jako kapalné elektroizolanty. Vznik těchto elektroizolačních kapalin byl požadován na základě vyšších ekologických nároků. Ovšem jejich elektroizolační vlastnosti se ještě zdaleka nevyrovnají minerálním olejům, které se používají v největším měřítku. V současné době je na trhu dostupný a v praxi využitelný například metylester kyseliny řepkového oleje (MEŘO). Určitými úpravami ho lze použít jako izolant pro napěťovou hladinu nízkého napětí. Velmi podobné vlastnosti má i etylester řepkového oleje a jeho směs s ropnými uhlovodíky. Vzácně se objevují netoxické silikonové elektroizolační kapaliny, nemísitelné s jinými oleji. [7] MIDEL 7131 je jedním z izolačních olejů na bázi organických esterů, který se již používá v praxi a to na místech, kde je nutná zvýšená ochrana lidí a majetku před nebezpečím ohně a tam, kde jsou zvýšené požadavky na životní prostředí. Jelikož splňuje normu ČSN 650201, lze transformátory s tímto olejem umisťovat dovnitř budov. [17]

**Tab. 5: Charakteristické vlastnosti vybraných syntetických kapalných izolantů [1]**

| druh kapaliny          | hustota            | $T_1$       | $\epsilon_r$ | $tg\delta$ | $E_p$              |
|------------------------|--------------------|-------------|--------------|------------|--------------------|
|                        | $kg \cdot mm^{-3}$ | $^{\circ}C$ | 50 Hz        | 50 Hz      | $kV \cdot mm^{-1}$ |
| isopropyldifenyl (IPD) | 998                | -55         | 2,8          | 0,002      | 23                 |
| dioktylfthalát (DOP)   | 990                | -45         | 5,2          | 0,01       | 13,8               |
| polydimetylsilxan      | 960                | -55         | 2,7          | 0,001      | 42                 |

### 1.2.1.3 Rostlinné oleje

Již na počátku 19. století se při konstrukci elektrických měřících přístrojů pro NN a VN používaly přírodní rostlinné oleje. Jednalo se o lněné oleje nebo o olej z řepky olejné, které byly lisované. V současné době se rostlinné oleje, které se používají pro elektrotechnické účely, získávají ze semen rostlin a jsou zpracovány do směsi esterů, glycerinů, nasycených a nenasyčených mastných kyselin. Postup pro zpracování semen je závislý na druhu olejnatých plodin, ze kterých se olej získává. Výsledná tekutina obsahuje zejména rozpustné a nerozpustné kyselé složky, které negativně ovlivňují elektroizolační vlastnosti. Odstranění těchto složek se provádí neutralizací, destilací a esterifikací.

Pokud se jedná o olej s vysokým číslem kyselosti, tak je vhodná pro následné zpracování destilace, kdy se nádoba s olejem zahřívá. Nežádoucí složky se v podobě páry odpařují do tepelného výměníku, kde se opět zkapalní. Esterifikace je proces, kdy dochází k reakci mezi olejem, alkoholem a akcelerátorem za vzniku vody a glycerolu, který je nutné odfiltrat. [8]

Výstupní vlastnosti oleje ovlivňuje z velké míry druh mastných kyselin, které olej obsahuje. Mezi nejrozšířenější skupiny mastných kyselin patří palmitové ( $C_{16}H_{32}O_2$ ), olejové ( $C_{18}H_{34}O_2$ ), linolové ( $C_{18}H_{32}O_2$ ) a linolové kyseliny ( $C_{18}H_{30}O_2$ ). Rostlinné oleje se dále dělí podle míry vysychavosti na nevysychavé (olivový, ricinový olej), slabě vysychavé (řepkový olej), polovysychavé (slunečnicový olej) a vysychavé (konopný, ořechový olej). [9] V závislosti na míře vysychavosti nastává v oleji větší či menší stupeň polymerizace. To je způsobeno reakcí nenasyčených mastných kyselin s kyslíkem. Následkem toho lze tyto vazby dále obecně dělit do tří základních skupin:

**Nasyčené mastné kyseliny** nemají žádnou nenasyčenou vazbu. Vyznačují se počtem uhlíkových atomů od 8 do 22 (palmitová a stearová kyselina).

**Mononenasyčené mastné kyseliny** mají jednu nenasyčenou vazbu. Počet uhlovodíkových atomů je od 10 do 22 (olejové kyseliny).

**Polynenasycené mastné kyseliny** mají více než jednu nenasyčenou mastnou vazbu. Nejčastěji jsou tvořeny 18 atomy uhlíku (linolová, linoleová kyselina).[8]

Polymerní reakce jsou urychleny např. zvýšenou teplotou, světelným zářením i elektrickými výboji. Následkem polymerace vzniká vyšší viskozita oleje, která zhoršuje odvod tepla z transformátoru. Mezi vlastnosti rostlinných olejů patří vysoká tepelná odolnost, vysoký bod vzplanutí a hoření. V praxi se mimo jiné již využívá olej BIOTEMP, který vyvinula společnost ABB. Vyrábí se ze zušlechtěných nebo geneticky modifikovaných semen. Výsledný olej je tvořen z více jak 80 % olejovými kyselinami. Tento olej nalez použití pro distribuční případně i menší výkonové transformátory díky tomu, že je stabilní vůči oxidaci. To je zapříčiněno vysokým obsahem mastných kyselin. Oxidační stabilita je ještě více podpořena modifikací oxidačních stabilizátorů. [10]

**Přírodní estery** vznikají modifikací standardních rostlinných olejů. Ta ve většině spočívá ve zneutralizování kyselých složek hydroxidem sodným, esterifikací, nebo jinou metodou. Modifikací rostlinné oleje dosahují potřebných vlastností. To se projevuje ve vyšší životnosti oleje a následně je tento olej stabilnější. To způsobuje vyšší odolnost vůči tepelné degradaci a zároveň je zachována biologická odbouratelnost. [8]

Tab. 6: Vybrané parametry jednotlivých druhů olejů [25, 26, 27]

| Parametr                                 | Minerální olej |            | Syntetický olej<br>MIDEL 7131 |            | Rostlinný olej<br>Biotemp |               | Přírodní estery<br>Cagrill FR3 |               |
|--|----------------|------------|-------------------------------|------------|---------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|
|  | měřicí metoda  | hodnota    | měřicí metoda                 | hodnota    | měřicí metoda             | hodnota       | měřicí metoda                  | hodnota       |
| $U_p$ na 2,5 mm[kV]                      | IEC 60156      | 70         | IEC 60156                     | 75         | IEC 60156                 | 76            | IEC 60156                      | 75            |
| tg $\delta$ při 90°C a 50 Hz [-]         | IEC 60247      | <0,001     | IEC 60247                     | <0,008     | IEC 60247                 | <0,020        | IEC 60247                      | <0,020        |
| Relativní permitivita při 20°C [-]       | IEC 60247      | 2,2        | IEC 60247                     | 3,2        | IEC 60247                 | 3,2           | IEC 60247                      | 3,1           |
| Tepelná vodivost při 20°C [W/m.K]        | ASTM D2717-95  | 0,126      | ASTM D2717-95                 | 0,144      | ASTM D2717-95             | 0,170         | ASTM D2717-95                  | 0,177         |
| Číslo kyselosti [mgKOH/g]                | IEC 62021-1    | <0,03      | IEC 62021-1                   | <0,03      | IEC 62021-1               | 0,06          | IEC 62021-1                    | 0,04          |
| Viskozita při 100°C [mm <sup>2</sup> /s] | ISO 3104       | 2,6        | ISO 3104                      | 5,25       | ISO 3104                  | 10            | ISO 3104                       | 8,4           |
| Bod tuhnutí [°C]                         | ISO 3016       | -50        | ISO 3016                      | -50        | ISO 3016                  | -20           | ISO 3016                       | -21           |
| Bod vzplanutí [°C]                       | ISO 2719       | 150        | ISO 2719                      | 260        | ISO 2719                  | 325           | ISO 2719                       | 316           |
| Bod hoření [°C]                          | ISO 2592       | 170        | ISO 2592                      | 316        | ISO 2592                  | 360           | ISO 2592                       | 360           |
| Biologická odbouratelnost [%]            | CEC L-33-A     | 25 (21dní) | OECD 301 F                    | 89 (28dní) | CEC L-33-A                | 97-99 (21dní) | CEC L-33-A                     | 97-99 (21dní) |

### 1.3 Pevné izolanty

Dělení pevných izolantů a dielektrik lze provést několika způsoby. Jedním ze způsobů dělení je na organické a anorganické. Organické látky jsou sloučeniny uhlíku, vodíku, kyslíku a v menším množství dalších prvků. Jedná se o látky nízkomolekulové nebo vysokomolekulové tzv. polymery. Ve většině případů jsou mechanické vlastnosti těchto materiálů značně závislé na teplotě. Z organických izolantů a dielektrik se ve velké míře používají materiály, které mají ve svém základu celulózu. Přesněji se jedná o papírové a textilní izolace. O těchto materiálech je psáno v kapitole 1.3.5, jelikož je tato práce převážně zaměřena na systém olej-papír. [1, 16, 19]

#### 1.3.1 Syntetické plastické hmoty

Organické syntetické látky se dále dělí podle zpracování na elastomery, termoplasty a reaktoplasty. Jejich využití pro elektroizolační účely se stalo postupem času nenahraditelným. **Elastomery** jsou pružné látky, které jsou tvořeny sítí polymerních řetězců. Tyto řetězce pak dále vytvářejí trojrozměrnou prostorovou strukturu. To způsobuje, že při vyložení malé síly je



lze zdeformovat, ale po působení deformační síly se vrátí do téměř původního stavu. Tato vlastnost se nazývá kaučuková elasticita. Velkou skupinu elastomerů tvoří kaučuky. Dále mezi elastomery patří např. polyizobutylen či změkčené PVC. Podobně jako přírodní kaučuky jsou ty syntetické schopné vulkanizace. Tento proces je podporován buď teplem, nebo katalyzátory. Za použití vulkanizačního činidla, kterým většinou bývá síra a její sloučeniny. Vulkanizací kaučuku vzniká pryž, která se v elektrotechnice používá převážně při výrobě kabelů. **Termoplasty** jsou makromolekulární látky, které reagují na působení tepla, díky kterému se stávají tvárné a plastické. To je zapříčiněno různou pohyblivostí polymerních řetězců při působení různých teplot. Zpracování se provádí vstřikováním, vyfukováním nebo odléváním do požadovaných tvarů. Termoplasty mohou být polární a nepolární. Polární termoplasty mají podstatně horší vlastnosti než nepolární. Mezi termoplasty patří např. polyetylen, polymetylmakrylát, polyamid, polyformaldehyd, polyvinylchlorid aj. Tyto materiály mají mimo jiné i dobré elektroizolační vlastnosti jako je vysoká elektrická pevnost, nízké ztráty, malá navlhavost. Pro tyto vlastnosti se hlavně používají při výrobě kabelů. Vlastnosti vybraných termoplastů jsou zobrazeny v tabulce 7. [1, 16, 45, 46, 47]

**Tab. 7 Vybrané vlastnosti vybraných termoplastů**

| termoplast | hustota<br>( $kg \cdot m^{-3}$ ) | $T_{max}$<br>( $^{\circ}C$ ) | $\log \rho$<br>( $\Omega \cdot m$ ) | $E_p$<br>( $kV \cdot mm^{-1}$ ) | $\epsilon_r$<br>(-) | $tg\delta$<br>(-)        |
|------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------|
| PE         | 910-960                          | 80-100                       | 13-16                               | 45-60                           | 2,2-2,3             | $2,0 \cdot 10^{-4}$      |
| PA         | 1140                             | 120                          | 6-12                                | 10-50                           | 4-10                | $(2 - 12) \cdot 10^{-2}$ |
| PVC        | 1380                             | 65                           | 12                                  | 40-50                           | 3,1                 | $1,5 \cdot 10^{-2}$      |
| PVCm       | 1300                             | 65                           | 9                                   | 50                              | 3,4                 | $1,2 \cdot 10^{-2}$      |

**Reaktoplasty** jsou látkami, které se na rozdíl od termoplastů při působení tepla vytvrzují. Stávají se nerozpustnými a netavitelnými. Základním materiálem pro reaktoplasty je monomer nebo oligomer v kapalné formě. Při opětovném zahřátí dochází k degradaci a postupnému zničení. Nevytvrzené reaktoplasty mají termoplastický charakter. Mezi reaktoplasty řadíme např. fenolformaldehydové pryskyřice nebo epoxidové pryskyřice. Tyto látky lze používat jako elektroizolační laky, lepidla nebo licí pryskyřice pro izolační součásti točivých strojů. Pro zhotovení izolačního systému točivých strojů se používají techniky RR a VPI, které jsou detailněji popsány v kapitole 1.3.6. [1, 16, 45, 46]

### 1.3.2 Sklo

Anorganické látky se dále dělí na amorfni a krystalické látky. Krystalické látky se dále dělí na monokrystalické a polykrystalické látky. O anorganických izolantech lze tvrdit, že jsou velmi tepelně odolné. Většina z těchto látek nepodléhá stárnutí a jsou odolné proti záření.

Pro elektroizolační systémy pro VN techniku se často využívají amorfni látky. Tou nejvýznamnější je sklo. Tento materiál je velmi silně polární, relativní permitivita se pohybuje od  $\epsilon_r = 3,7$  pro čistě křemenová skla až do  $\epsilon_r = 16$  pro olovnatá skla. V praxi se setkáváme se slitinami skla a z toho důvodu je  $E_p$  přibližně  $40 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Pro VN techniku je konkrétně vhodné borosilikátové sklo zvané Simax, nebo hlinitoborokřemičité sklo neboli Eutal, ze kterého se dále vyrábí skleněná vlákna. Tato skleněná vlákna se např. používají v elektroizolačních systémech pro točivé stroje, o kterých je detailněji psáno v kapitole 1.3.6. [1, 16]

### 1.3.3 Keramika

Jedním z nejdůležitějších polykrystalických materiálů pro elektrotechniku je keramika. Chemicky obsahuje různé materiály, ale její hlavní složky jsou oxid hlinitý, oxid křemičitý a voda. Vypálená keramika obsahuje fázi krystalickou, skleněnou a plynnou. Tyto fáze dále určují i vlastnosti výsledné keramiky. Krystalická fáze ovlivňuje fyzikální vlastnosti materiálu, skelná fáze vypovídá o technologickém postupu při zpracování a plynná fáze ovlivňuje mimo jiné i elektrickou pevnost. V elektroizolačních systémech VN techniky se lze nejčastěji setkat se steatitem, což je druh křemičité keramiky. Je vhodný pro obzvláště mechanicky namáhané izolátory. Jejich příklad je zobrazen na obr. 1.6. Svoje místo ovšem najde i jako dielektrikum v kondenzátorech [1, 16]



Obr. 1.6 Keramické izolátory (převzato z [20])

### 1.3.4 Slída

Slída je anorganická polykrystalická látka, která je složena z velkého množství krystalů. Chemicky lze slída popsat jako kyselý křemičitan hlinitodraselný  $KAl_2(OH)_2AlSi_3O_{10}$  tzv. muskovit. Někdy se tento druh slídy označuje jako slída draselná. Dále existuje kyselý

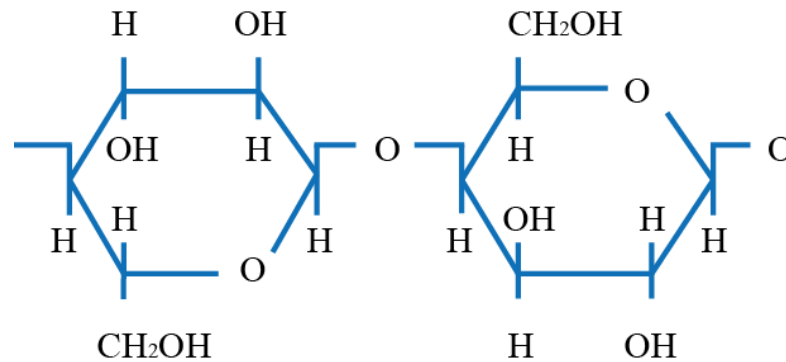
křemičitan draselnohlinitohořečnatý  $KMg(OH)_2AlSi_3O_{10}$  tzv. flogopit. Tato slída se označuje i jako slída hořečnatá. Jednotlivé krystaly slídy vytvářejí vrstevnatou strukturu. Z tohoto důvodu lze slídu štípat na plátky o tloušťce 0,05 mm. Čistá slída má vynikající elektrické vlastnosti. Ve slídě se uplatňuje iontová polarizace, díky tomuto faktu se mění vlastnosti podle roviny krystalu (viz tab. 8). Elektrická pevnost je ovlivněna obsahem vody v krystalech. Dielektrické ztráty jsou značně závislé na teplotě a frekvenci. Pro nízké frekvence  $\text{tg } \delta$  s teplotou roste, pro vyšší frekvence klesá. Tyto vlastnosti vypovídají o dobrých izolačních a teplovzdušných předpokladech. V EIS pro VN se slída používá jako dielektrikum pro kondenzátory. Po dalším zpracování, kdy se z jemných částic vyrábí slídový papír. Tento slídový papír se následně používá např. jako izolační bariéra při výrobě točivých strojů pro VN a to buď způsobem RR nebo VPI. Více je o těchto výrobních technologiích popsáno v kapitole 1.3.6. Další možností je užití mleté slídy, která se přidává do nízkotavitelného skla a tím vzniká např. lisovaná izolace tzv. mikalex. [1, 16]

Tab. 8 Charakteristické vlastnosti slídy [1]

| měřená veličina          |                         | hodnota                   |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| $\epsilon_r (-)$         | při 50 Hz               | 5 - 7                     |
| $\rho (\Omega \cdot m)$  | muskovit kolmo          | $10^{13} - 10^{14}$       |
| $\rho (\Omega \cdot m)$  | muskovit rovina         | $10^6 - 10^7$             |
| $E_p (kV \cdot mm^{-1})$ | tloušťka 1 mm           | 40 - 60                   |
| $\vartheta (^\circ C)$   | teplotní nezávislost do | 400 - 450                 |
| $\text{tg } \delta (-)$  | muskovit                | $(1 - 3) \cdot 10^{-4}$   |
| $\text{tg } \delta (-)$  | flogopit                | $(10 - 50) \cdot 10^{-4}$ |

### 1.3.5 Celulóza

Papír je organický izolant přírodního původu, vyrábí se ze dřeva zhutňováním vláken. Je to materiál, jehož základem jsou rostlinná vlákna na základě celulózy. Hlavním zdrojem celulózy je dřevo, bavlna, len nebo jiné rostlinné suroviny. Neupravený papír obsahuje jen celulózu a je velmi savý. Aby se dosáhlo požadovaných vlastností papíru, tak se do něj přidávají různé polymery, pojiva a plniva. Celulóza je základní hmota rostlinných tkání. Technická celulóza se označuje termínem buničina. Jedná se o lineární polysacharid složený z jednotek D-glukopyranosy spojených  $\beta$  řetězci. Chemickou strukturu celulózy lze popsat chemickým vzorcem  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , který je zobrazen na obr. 1.7. Jednotlivé celulózové molekuly jsou spojené vodíkovými vazbami. Tato látka je silně polární, má vysoké dielektrické ztráty a permitivitu. Je nerozpustná ve vodě a v některých chemikáliích, snadno navlhá. [1, 2, 8, 21, 22]



Obr. 1.7 Molekuly celulózy (překresleno z [23])

Při zpracování celulózy se používá kraft proces, který se provádí chemicky. Během tohoto procesu se ze základní suroviny (dřevo, bavlna, len) odstraní nežádoucí složky jako je hemicelulóza, ligniny a jiné organické a anorganické složky. Kraft proces se provádí pomocí hydroxidu sodného (NaOH) a sulfátu sodíku ( $\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}$ ). Vzniklá celulózová vlákna se dále ve formě kaše melou v rafinéri. Zde se upravují na požadovanou délku. Poté se z této hmoty odstraní nežádoucí nečistoty, naředí se vodou a následně se rozmixuje. V konečné fázi se musí zbavit vody. To se provádí přesíváním a sušením během válcování. [2]

### 1.3.5.1 Papír

Elektroizolační papír se v největší míře používá pro elektroizolační systém olej-papír pro výkonové transformátory. Funguje zde jako pevná složka EIS. Při výrobě výkonového transformátoru se papír používá ve formě transformátorového papíru a lepenek. Ty jsou doplněny ještě dřevem. V rámci EIS je důležité dodržet určité vlastnosti materiálu jako je rovnoměrnost papíru a tepelná stálost. Na obr. 1.8 je vyobrazena ukázka potřebných papírových součástí pro výrobu výkonového transformátoru. Pro ovin vodičů vinutí se převážně používá transformátorový papír ( $0,075 \text{ mm} \div 0,8 \text{ mm}$ ) a to díky elasticitě a flexibilitě. Ovin vinutí se provádí ve více vrstvách, dle požadavků na dimenzování izolace, což zajistí mechanické a následně i elektrické vlastnosti. V praxi se používá např. krepový papír, který postupem času ztrácí elasticitu. Dále pak Clupak papír, který disponuje výbornými elektrickými i mechanickými vlastnostmi. Podstatný pro výkonové transformátory je **tepelně upravený papír**. Tento druh papíru se vyznačuje omezením tepelné degradace izolačního materiálu, což následně vede ke zpomalení stárnutí EIS. Toto omezení tepelné degradace je zaručeno díky přidání stabilizátorů do papíru. Transformátorová lepenka ( $0,8 \text{ mm} \div 8 \text{ mm}$ ) disponuje vyšší mechanickou pevností než transformátorový papír. V praxi se používají tři základní druhy lepenek a to kalandrovaná, formovaná a tvrzená. Jednotlivé druhy

se od sebe liší způsobem výroby, obsahem vody a hustotou. Nejpoužívanějším druhem je v současné době tvrzená lepenka, která je stabilní, má výborné mechanické vlastnosti a vysokou hustotu. Tyto vlastnosti jsou zaručeny způsobem výroby, jelikož se tvrzená lepenka vyrábí za vysoké teploty a tlaku. Při výrobě transformátoru se používá např. pro zhotovení izolace mezi vinutími, nebo kanálů k usměrnění toku oleje ve vinutí. Mezi evropské nejvýznamnější výrobce papírových a dřevěných komponentů pro výrobu výkonových transformátorů patří švýcarská společnost Weidmann. [8]



Obr. 1.8 Papírové komponenty pro výrobu transformátoru (převzato z [23])

### 1.3.6 Kompozitní materiály pro točivé stroje

Při výrobě izolačního systému pro statory točivých strojů jsou v současné době nejpoužívanější metody Resin Rich (RR) a Vacuum pressure impregnation (VPI). Tyto dvě metody se dále v praxi kombinují a vylepšují. V obou případech je izolační materiál tvořen třísložkovým izolačním systémem, který ve výsledku tvoří kompozit. Tento kompozit je tvořen z nosné složky, pojiva a dielektrické bariéry. Nosná složka ovlivňuje mechanické vlastnosti izolačního systému. Pojivo zajišťuje spojení všech složek kompozitního materiálu a do velké míry na něm závisí výsledná teplotní třída izolačního systému. Dielektrická bariéra má svoji důležitost pro výslednou elektrickou pevnost kompozitu. [11]

### 1.3.6.1 Systém Resin Rich

Tato technologie výroby elektroizolačního systému se vyznačuje výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem, ve kterém je 20 až 40 % pojiva. Toto množství pojiva se zde vyskytuje z důvodu vytvoření požadované tloušťky stěny. Bohatý obsah pryskyřice dal i název této technologii. Jako materiál pro pojivo je zde použita reaktoplastická bezrozpuštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Pro nosnou složku se většinou používají skleněná vlákna, která mohou být uspořádána do vazby látkové, plátňové nebo keprové. Skelná vlákna mohou být také zpracována jako whiskery či rouno. Používají se mimo jiné i další materiály jako je např. amaridová vlákna. Další možností použití pro nosnou složku je folie z PEN nebo PET. Izolační bariéra je většinou tvořena z kalcinovaného nebo nekalcinovaného slídového papíru. Mezi jeho vlastnosti patří hutnost, dále je slídový papír pevnější a méně nasákavý. Tloušťka pásy se pohybuje mezi hodnotami 0,15 mm a 0,2 mm, šířka je cca 2 cm. [2, 13]

Aplikace systému Resin-Rich se využívá pro základ tyčového vinutí, kde se vytváří souvislá vrstva materiálu. Tloušťka této vrstvy je závislá na jmenovitém napětí zhotovovaného stroje. Vytvrzení do předepsaného rozměru probíhá ve formách, které umožňují stlačení izolace při teplotě 160 °C až 170 °C. Doba vytvrzení se pohybuje kolem jedné hodiny a je závislá na druhu pryskyřice a tloušťce izolace. Následné ochlazení musí být velmi pozvolné. Poté následuje vysoušení. Po této celkové úpravě jsou tyče vinutí připraveny k montáži do stroje. [2]

### 1.3.6.2 Systém vakuově-tlakové impregnace

Anglický název této technologie je Vacuum Pressure Impregnation (VPI). Pro tento způsob výroby elektroizolačního systému pro točivé stroje se používají materiály, které se zpracovávají ve vakuu a za vysokého tlaku. Charakteristický materiál pro VPI je savá slídová páska, která zde tvoří hlavní materiál. Tato savá slídová páska je vyrobena z nekalcinovaného slídového papíru a při impregnaci je nasycena impregnantem. Savost slídy je velmi důležitá, jelikož se realizují i větší počty vrstev, číselně více než 10 vrstev. Z důvodu dokonalého proimpregnování všech vrstev. Jako impregnant se používají nízkomolekulární bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny. Nosnou složku zde tvoří, stejně jako u technologie Resin-Rich, skleněné vlákno nebo PEN či PET folie. Obsah pojiva v kompozitu při této technologii se pohybuje maximálně

do 7 %. Pojivo je potřeba jen při mechanickém zpracování pásky. Používá se zde převážně epoxidová nebo novolaková pryskyřice. Aplikovat VPI lze dvěma způsoby. Prvním způsobem je VIW (Vacuum Impregnated Winding Method), kdy se jedná o celkovou impregnaci statoru. Nelze opravovat jednotlivé poškozené části stroje, vždy nutné celkové převinutí. V druhém případě se jedná o VIB (Vacuum Impregnated Bar Methode), kdy se impregnují jednotlivé tyče. Pro malé a střední stroje se aplikuje metoda VIW a pro velké stroje metoda VIB. [12]

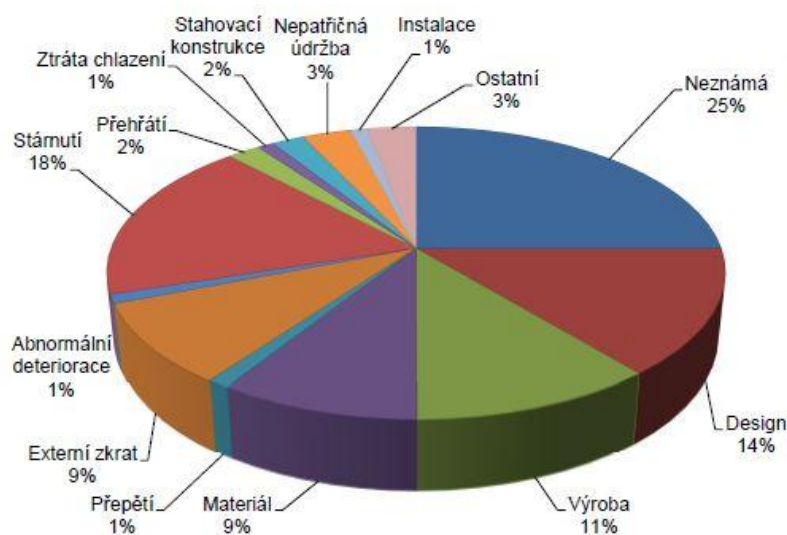
Při použití metody VPI se impregnace provádí v kotli, který je vakuotěsný a tlakotěsný s možností ohřevu a chlazení. Zpracované izolované vinutí se nejdříve suší při teplotě nad 100 °C po dobu 20 hodin. Následně je celý stator nebo vinutí umístěno do impregnačního kotle, který je ode dna zaplněn impregnantem. V této nádobě se nachází vakuum. Poté se na jednu hodinu do kotle zavede přetlak inertního plynu. Po vytažení z impregnace je vinutí přemístěno do sušárny. Zde dochází ke konečnému vysušení a vytvrzení. Nejdříve se vinutí suší za mírného podtlaku, aby vyprchaly těkavé složky. Poslední fáze je dosoušení. Probíhá při atmosférickém tlaku a proudění horkého vzduchu. Časová náročnost se pohybuje kolem 20 hodin. Důležité je v prvních hodinách sušení s vinutím otáčet, aby nedošlo k nepravidelnému stékání impregnantu do spodní části. [8, 14]

### 1.3.6.3 Porovnání VPI a RR

Technologie Resin-Rich (RR) a Vacuum Pressure Impregnation (VPI) jsou velice rozdílné. Rozdíl jsou ve specificky určených vlastnostech, které následně navazují na technologickou a časovou náročnost při aplikaci. Obě metody mají své výhody i nevýhody. Systém Resin-Rich je náročný na přesné přípravky pro vytvrzení a na přesnost dodržování technologických postupů. Kvalita zpracování je v tomto případě více závislá na lidském faktoru. Ovšem pokud se najde vadná cívka, je možno jí bez problémů vyměnit. Systém VPI je náročnější v rámci prvotní investice při pořízování výrobní linky. Jedná se o technologii, která je vhodnější pro sériovou výrobu. Mezi výhody patří úspora materiálu až o 6 %, homogenita vinutí a s tím následně spojená i vysoká spolehlivost, lepší odvod tepla, minimalizace částečných výbojů, vysoká odolnost proti navlhání, v neposlední řadě i zmenšení velikosti stroje při zachování požadovaného výkonu. Pokud je vinutí proimpregnováno do jednoho celku, je poté obtížné uskutečnit jakoukoliv opravu. Jednoznačně nelze říct, která z těchto technologií je lepší, ale v současné době se světově více používá systém VPI. [2, 15]

## 2 Degradční mechanismy EIS olej-papír

Elektroizolační systém tvořící kombinované dielektrikum olej-papír se používá pro výkonové transformátory. Tyto elektrické netočivé stroje jsou jedním z nejdůležitějších zařízení energetické soustavy a to hlavně z hlediska spolehlivosti. Během provozu transformátorů dochází k degradaci EIS, jenž vzniká v důsledku stárnutí jednotlivých součástí elektroizolačního systému. Stárnutí a samotná degradace EIS je dle analýzy [28] příčinou z 18 % veškerých poruch v transformátorech. Vyšší hodnotu nabývají již jen neznámé příčiny poruch, jak je možno vidět na obr. 2.1. A to je další důvod zabývat se touto problematikou. Stárnutí EIS je definováno jako souhrn fyzikálních a chemických změn, ke kterým dochází v závislosti na čase působením vlivů a podmínek, kterým je EIS vystaven. Projevem je postupné znehodnocení izolantu, jakož i trvalé zhoršení funkčních vlastností izolantu.

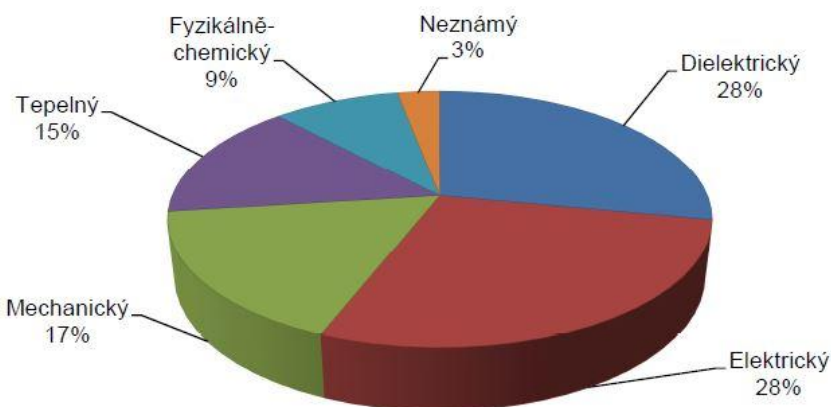


Obr. 2.1 Výsledky analýzy – příčiny poruch transformátoru (převzato z [28])

Degradaci lze rozdělit na elektrickou, mechanickou, tepelnou a chemickou. Jednotlivé druhy degenerací se vzájemně ovlivňují. Degradací, která se nejvíce projevuje, je tepelná degradace. Teplo dále urychluje jiné druhy degradace jako je elektrická a chemická. Mechanická degenerace vzniká ve většině případů kombinací vibrací magnetického obvodu v důsledku magnetostrické plechů a elektrodynamických sil mezi závity vinutí [8]. Tento druh degenerace ovšem není tak závažným problémem u kvalitně vyrobených transformátorů, a proto je vynechán. Stárnutí ovlivňuje důležité elektrické a mechanické vlastnosti zařízení. Všechny tyto změny se následně promítají do celkové životnosti transformátoru. Životnost zařízení je z podstatné části závislá převážně na EIS. A to z toho důvodu, že elektroizolační



system vytváří potenciálové bariéry[35]. Následné porušení této potenciálové bariéry vede k poruše. Na obr. 2.2 jsou graficky zobrazeny druhy poruch transformátorů dle uskutečněné analýzy. Nejčastějším druhem poruch jsou dielektrické, jako jsou částečné výboje, propojení vodivou cestou, nebo přeskok [28]. EIS transformátoru tvoří dvě složky a to olej a papír. Právě životnost papírové izolace je v porovnání s jinými konstrukčními materiály kratší. Tuto skutečnost podporuje i fakt, že svůj vliv na papír má i stav oleje, jelikož jsou tyto složky úzce provázané. V otázce výběru druhu oleje se v současné době hledají alternativy k zavedeným a hojně využívaným minerálním olejům, které mají uspokojivé hodnoty důležitých parametrů jako např. ztrátový činitel či průrazné napětí. Ovšem minerální oleje nejsou dostatečně tepelně odolné a hlavně nejsou biologicky odbouratelné. Na základě těchto požadavků je trend najít využití v této oblasti pro rostlinné oleje a oleje na bázi přírodních esterů.



Obr. 2.2 Výsledky analýzy – druhy poruch transformátoru (převzato z [28])

## 2.1 Tepelná degradace

Tepelná degradace má nejvýznamnější podíl na celkové degradaci transformátoru. Tento druh degradace je závislý na podmínkách provozu transformátoru, okolní teplotě, četnosti a délce přetížení či způsobu provozu transformátoru. Hlavním činitelem způsobující stárnutí EIS bývá ve většině případů teplo. Zbývající vlivy jsou přidružující, podporují vznik poruchy, kterou způsobilo tepelné namáhání. Vlivem oteplení postupně dochází i k chemické degradaci pevné složky, což je detailněji popsáno v kapitole 2.3. Projevy tepelné degradace jsou v největší míře patrné ze ztrát, které se realizují při provozu. Jedná se o ztráty ve vinutí a ztráty magnetického obvodu. Na těchto částech se vytváří největší množství tepla a tím je možné více urychlit samotné stárnutí EIS. Všechny tyto reakce probíhají při všech teplotách, ovšem s rostoucí teplotou rychlost reakcí vzrůstá. Je nutné upřesnit, že pro rychlost stárnutí

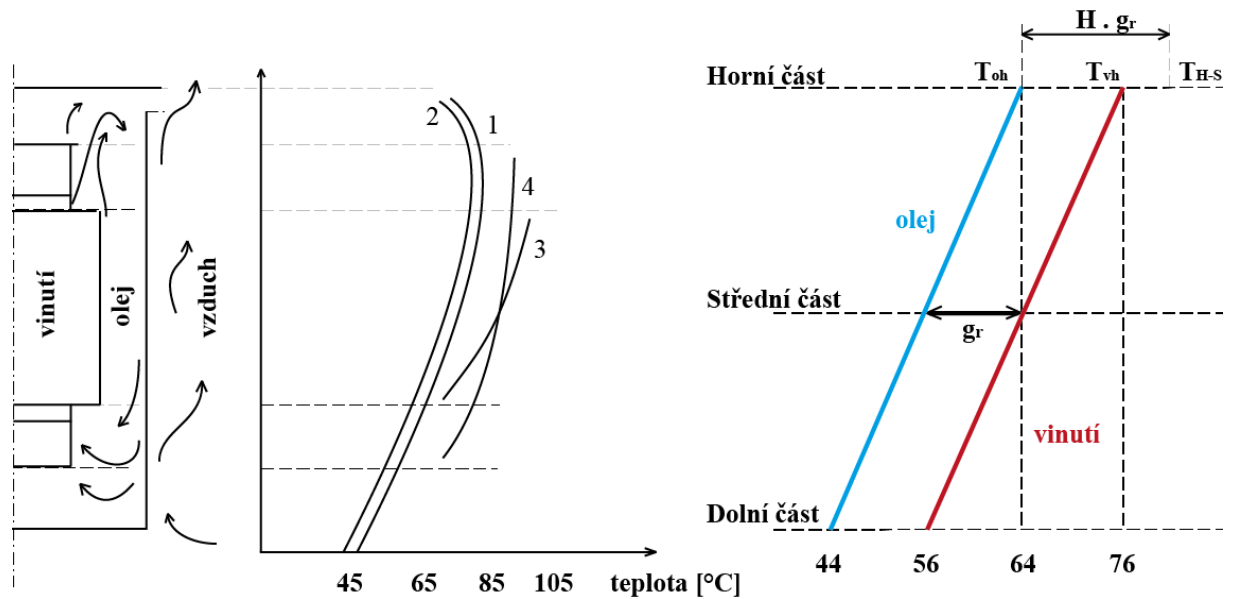
není rozhodující množství přivedeného tepla, ale výše teploty. S tím souvisí i stanovení bodu nejvyšší teploty. Všechny tyto parametry jsou stanoveny pro daný okamžik a případné propočítání prognóz pro budoucí stav EIS je velmi těžké, jelikož nelze přesně vyčíslit všechny ovlivňující faktory a vlastnosti oleje i papíru.

Ztráty ve vinutí jsou zapříčiněny **Joulovými ztrátami**  $P_j$ . Příčinou vzniku těchto ztrát jsou odporové vlastnosti vinutí. Dále pak skinefekt, ke kterému dochází při vzniku elektromagnetického pole. S tím dále souvisí ztráty vířivými proudy. Čím vyšší je zatížení transformátoru, tím jsou větší Joulovy ztráty. Ovšem ztráty v železe jsou relativně nižší. Pokud se mají definovat **ztráty magnetického obvodu**, tak se jedná o ztráty v železe  $P_{Fe}$ . Lze je členit do tří druhů, podle svého původu. Prvním druhem jsou **ztráty vířivými proudy**  $P_v$ , které způsobují ohřev feromagnetika v důsledku uzavření siločar střídavého pole, jelikož zde působí elektrická vodivost. Za druhý druh lze označit **hysterezní ztráty**  $P_h$ , které vznikají při vytváření elektromagnetického pole při magnetizaci feromagnetika. Tyto ztráty jsou přímo úměrné obsahu plochy ohraničené hysterezní smyčkou. Posledním druhem ztrát jsou **přídavné ztráty**  $P_d$ , které se projevují ve vodičích (vinutí a přívodní vodiče), v železných částech stahovací konstrukce, v nádobě a také v dielektriku. Velikost přídavných ztrát je určena vztahem z rovnice 2.1. Vznik přídavných ztrát je dán vířivými proudy, které se vytvářejí ve středovém rozptylovém magnetickém poli. Přídavné ztráty rostou se zvětšením rozměru vodiče kolmého k rozptylovému poli. [29, 48]

$$P_d = P_{Fe} - (P_v + P_h) \quad (2.1)$$

To, že je tepelné stárnutí a jeho rychlost důležitý ukazatel pro celkovou degeneraci EIS je zřejmé i ze skutečnosti, že se stala základním ukazatelem v normě ČSN IEC 600076-6, která se věnuje monitoringu teploty. Jelikož velikost teploty je ukazatel, podle kterého lze diagnostikovat poruchy během provozu transformátoru a to i z důvodu, že rozložení teploty v transformátoru není homogenní. Konkrétně se teplota zvyšuje v závislosti na vzdálenosti ode dna nádoby, jak je vidět na obr. 2.3, kde je i patrné jakým způsobem protéká v transformátoru olej, který má mimo jiné i chladicí funkci. Teplota je přímo úměrná k rychlosti degradace. Lze tedy tvrdit, že čím je vyšší teplota prostředí, tím je míra degradace vyšší. Přesnější určení nejvyšší teploty v transformátoru se provádí výpočty určením tzv. **Hot-spot teploty**. Jedná se o teplotu nejteplejšího místa ve vinutí a hledá se z důvodu definice nejslabšího a zároveň nejvíce tepelně namáhaného místa. Tato hodnota se vypočítává na základě aktuálního provozního stavu a také na základě změření teploty horní vrstvy oleje

pomocí několika teplotních čidel, které jsou připojena ke konci optického vlákna pro získání co nejpřesnější hodnoty. Následný výpočet se provádí pomocí vztahu (2.2) a (2.3).[29, 30]



Obr. 2.3 Průběh teploty v závislosti na výšce transformátoru a rozložení teploty (překresleno z [29], [8])  
 1 – teplota oleje, 2 – teplota stěny nádoby, 3 – teplota vinutí, 4 – teplota magnetického obvodu

$$T_{H-S} = T_{oh} \cdot g_r \cdot K^w \tag{2.2}$$

$$T_{H-S} = T_{oh} + (T_{vh} - T_{oh}) \cdot (h - 1) \tag{2.3}$$

$T_{H-S}$  hot-spot teplota [°C]

$T_{oh}$  teplota oleje v horní části transformátoru [°C]

$T_{vh}$  teplota horní části vinutí [°C]

$g_r$  rozdíl teploty vinutí a oleje při jmenovitých podmínkách [°C]

$H$  činitel nejteplejšího místa [-]

$w$  exponent proudu v závislosti na oteplení vinutí [-]

$K$  poměr jmenovitého a zatěžovacího proudu [-]

Papír jako pevná část EIS transformátoru je nejméně tepelně odolný. Jelikož patří do tepelné třídy, kde je maximální provozuschopná teplota 105 °C. Pokud se uvažuje o plně zatíženém transformátoru, tak se jeho teplota pohybuje od 95 °C do 110 °C. Zákonitě, čím je teplota vinutí vyšší, tím se více urychlí degradace papíru. Samotná akcelerace v podobě zvýšení provozní teploty byla experimentálně definována dle [31] následovně. Pokud se zvýší teplota o 8 °C, tak životnost izolace klesne na polovinu. Tepelnou odolnost papíru lze zvýšit tepelnou úpravou. Kdy se celulósový papír chemicky upraví a tím se sníží rychlost rozkladu. „Tyto účinky jsou redukovány buď částečnou eliminací vodou formovaných činidel, nebo

*inhibicí formace vody prostřednictvím užitých stabilizačních činidel.* [30]“ Dle normy [32] je papír tepelně upraven, pokud splňuje kritéria definována v ANSI/IEEE C57:100, kde je definováno mezní zachování 50% pevnosti v tahu po 65000 hodinách v těsněné trubici při 100 °C, nebo při jakémkoliv poměru času  $t$  [h]/teplota  $\theta_h$  daný vztahem 2.4. Při použití dnešních technologií je **relativní rychlost stárnutí**  $\tau_r$  definována rovnicí 2.5 a pro tepelně upravený papír rovnicí 2.6. Ovšem obě tyto rovnice vycházejí ze základní Arrheniovy rovnice 2.7. [30, 35]

$$t = e^{\left(\frac{15000}{(\theta_h+273)} - 28,082\right)} \approx 65000 \times e^{\left(\frac{15000}{(\theta_h+273)} - \frac{15000}{(110+273)}\right)} \quad (2.4)$$

$$\tau_r = 2^{\frac{(\theta_h-98)}{6}} \quad (2.5)$$

$$\tau_r = e^{\left(\frac{15000}{110-273} - \frac{15000}{\theta_h+273}\right)} \quad (2.6)$$

$\theta_h$  teplota hot-spot vinutí [°C]

$$\tau = a \cdot e^{-\frac{W_a}{RT}} \quad (2.7)$$

$W_a$  aktivační energie procesu [eV]

$R$  univerzální plynová konstanta

$a$  konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul

$T$  absolutní teplota [T]

Relativní rychlost stárnutí  $\tau_r = 1$  pro kraft papír nabývá hodnoty 98 °C a pro tepelně upravený papír 110 °C. Pokud se uvažuje olej na bázi přírodních esterů, tak je možno zjistit, že tyto oleje v kombinaci s pevnou složkou přispívají k pomalejšímu rozkladu celulózy. Díky této skutečnosti vykazuje papír vyšší mechanickou odolnost. V důsledku tohoto faktu se  $\tau_r = 1$  vztahuje pro teplotu 130 °C. [8] Následně je možné alespoň přibližně matematicky stanovit zkrácenou životnost pro daný časový úsek vztahem (2.8) a (2.9).

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \tau_r dt \quad (2.8)$$

$$L = \sum_{n=1}^N \tau_n \times t_n \quad (2.9)$$

|          |  |
|----------|--|
| $\tau_n$ | relativní rychlost stárnutí v časovém úseku $n$ podle vztahu (2.5) a (2.6) |
| $t_n$    | $n$ -tý časový úsek  |
| $n$      | číslo každého časového úseku   |
| $N$      | celkový počet časových úseků v průběhu uzavřené periody                    |

V souvislosti s tepelnou degradací se realizují oteplovací zkoušky, které se provádějí buď on-line nebo off-line podle normy ČSN EN 60076-2. Tuto zkoušku je možno aplikovat více způsoby, jako je zapojení vinutí nakrátko, připojení zátěže a následné napájení s přibližně jmenovitým napětím a proudem, nebo vzájemným zatěžováním transformátorů. Kdy se jedná o paralelní spojení dvou transformátorů, které jsou napájeny jmenovitým napětím, zatímco je jmenovitého proudu dosaženo rozdílným převodem transformátoru. Během oteplovací zkoušky jsou zjištěny tyto parametry:

- Oteplení horní vrstvy kapaliny a střední vrstvy kapaliny.
- Střední oteplení vinutí při jmenovitém proudu, střední oteplení kapaliny.
- Oteplení hot-spot vinutí při jmenovitém proudu a při oteplení horní vrstvy kapaliny.

Všechny hodnoty jsou získány za ustáleného stavu, při zohlednění celkových ztrát. Samotná oteplovací zkouška se provádí dvěma metodami a to buď pomocí celkových ztrát, nebo pomocí jmenovitého proudu. Výsledné naměřené hodnoty určují aktuální stav transformátoru a jeho EIS, následně se tyto získané hodnoty mohou použít i pro dynamické výpočty. [33, 34]

## 2.2 Elektrická degradace

Elektrická degenerace vzniká působením elektrického pole. Jedná se o všechny druhy namáhání, které jsou způsobeny vlivem elektrického napětí. Charakter tohoto namáhání může být popsán pomocí tvaru, frekvence, hladiny, spojitosti či determinovanosti napětí. Na provozní intenzitu elektrického pole je EIS dimenzován. Pokud se hovoří o elektrické degeneraci a s ní i spojeným působením elektrického pole, tak jsou nejpravděpodobnějším projevem částečné výboje. Působením částečných výbojů je podporován dlouhodobý proces stárnutí EIS. Mezi další projevy elektrické degenerace patří bludné proudy, lokální oteplení, přepěťové jevy, zvýšení ztrát a snížení elektrické pevnosti. Všechny tyto parametry mohou ovlivnit následný provoz transformátoru, kdy při vyšším provozním napětí dochází

ke zhoršení a urychlení celkové degenerace, která ovlivňuje i kvalitu oleje. Nejčastější příčinou elektrické degradace jsou částečné výboje, ke kterým dochází jak na povrchu, tak i uvnitř izolačního materiálu. Částečné výboje se dají rozdělit do několika skupin podle místa výskytu na vnitřní, povrchové a korónové. Důsledkem působení těchto jevů neodvratitelně dochází k elektrickému průrazu pevné složky (papír) či k přeskoku v kapalině (olej). To znamená, že EIS je nenávratně poškozen a tudíž i celé zařízení. [35, 29, 8]

Konečná fáze elektrické degradace spočívá v průrazu pevného materiálu. U kapalných a plyných materiálů se jedná o přeskok. Tyto jevy jsou spojeny s poklesem napětí a vzrůstem proudu. Nastanou, pokud je překročena kritická hodnota gradientu pole. Podstatnými faktory je elektrická pevnost, teplota, tloušťka izolantu, charakter a druh elektrického pole. Dále pak kmitočet, doba působení elektrického pole, případně i vliv částečných výbojů v plynových bublinkách. Průraz se podle své příčiny dále dělí na čistě elektrický průraz a tepelný průraz. Čistě elektrický průraz je podmíněn elektronovým mechanismem. Doba trvání se ve většině případů pohybuje mezi  $10^{-7}$  s až  $10^{-8}$  s. Elektrická pevnost je konstantní a je nezávislá na působení napětí. Tepelný průraz má průběh pomalý, jedná se řádově o několik sekund až minut. Elektrická pevnost s dobou působení napětí klesá a není podmíněna elektronovými procesy. Příčinou tepelného průrazu je tepelná nestabilita dielektrika. Vzniká více tepla, než je reálné odvést z materiálu. Na teplotě je závislá i kritická proudová hustota, při které dojde k průrazu. Jinými slovy s rostoucí teplotou elektrická pevnost klesá. [37]

Přesný mechanismus vlivu elektrického stárnutí na životnosti EIS není v současné době znám. To s čím se zatím pracuje, při přibližném určování elektrického stárnutí, jsou modely stárnutí. Mezi nejjednodušší a nejpoužívanější empiricky odvozené modely patří mocninový model (2.10) a exponenciální model (2.11). Tyto modely nejsou závislé na struktuře systému, rozložení elektrického pole, konfiguraci elektrod ani na aktivitě částečných výbojů. Těchto modelů se v praxi používá pro určení životnosti izolačního systému, který je vystavený účinkům pulzního namáhání. [36]

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (2.10)$$

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (2.11)$$

|              |  |
|--------------|--|
| $\tau$       | doba života [h]  |
| $E$          | intenzita elektrického pole [ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ] |
| $a, k, n, b$ | konstanty, které jsou určeny empiricky                         |

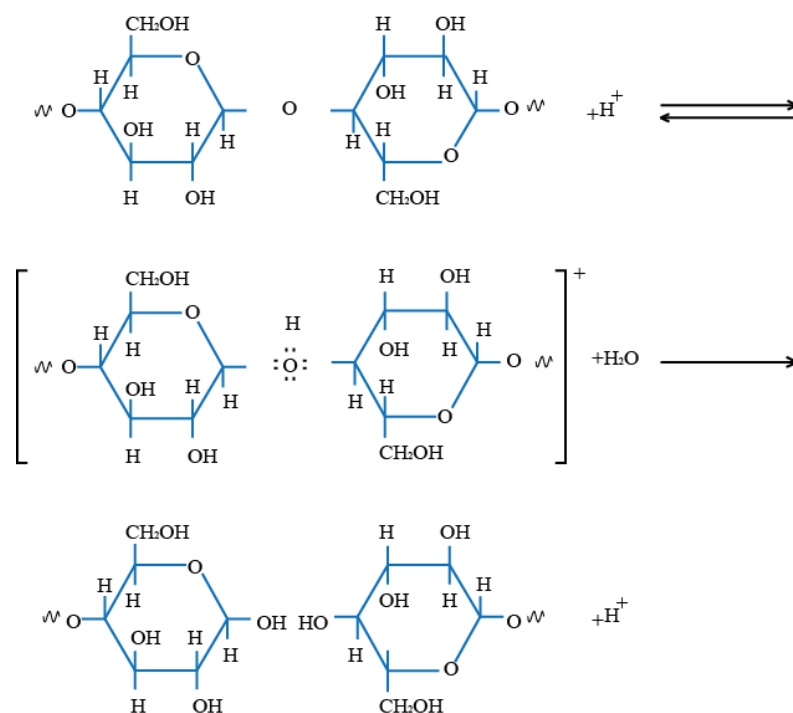
Příčinou elektrické degradace jsou ve většině případů technologické nedokonalosti zhotovení transformátoru, jako je např. nedostatečné vysušení a následná impregnace papírové izolace, nebo oddělování jednotlivých vodivých i nevodivých částí. Tyto nedokonalosti následně přispívají ke vzniku přeskočů či průrazů a tím je transformátor zničen. V neposlední řadě může ke zničení transformátoru přispět i připojená zátěž. I když je již standardem, že jsou tyto zařízení náležitě dimenzována na běžně používané střídavé sinusové napětí o frekvenci 50 Hz, je zde otázka pulzního namáhání. Právě pulzní namáhání je v poslední době velmi závažným problémem při samotném dimenzování, jelikož se rozšířilo použití měničů, které jsou zapojeny do elektrizační soustavy v rámci provozu obnovitelných zdrojů a stejnosměrných linek. [8, 35, 36]

Dle teoretického předpokladu chování izolačního materiálu lze definovat 3 oblasti elektrické degenerace, které se objevují během provozu i u systému olej-papír. Tyto oblasti se od sebe liší velikostí elektrického pole a dobou, po kterou elektrické pole působí na EIS. V první oblasti je intenzita elektrického pole nejvyšší a časový úsek nejkratší. Tím vzniká rychlý tepelný průraz v důsledku Joulových ztrát. Vztahem velikosti elektrického pole ve druhé oblasti k celku je možné tvrdit, že velikost elektrického pole nabývá střední velikosti. Jedná-li se jen o druhou oblast, je zde zvýšená intenzita elektrického pole a změna doby života je nízká. To má za následek, že zde dochází k elektrochemickému průrazu. Ve třetí oblasti jsou již mezní hodnoty elektrického pole zanedbatelné. [8]

### 2.3 Chemicko-tepelná degradace

Chemická degradace může mít několik příčin, ale ten nejvýznamnější podíl má teplota, bez které by se většina chemických procesů nerealizovala. Je dokázáno, že při každém nárůstu teploty o 10 °C se rychlost chemické reakce zdvojnásobí [40]. Při zvýšení provozní teploty o 10 °C dochází ke snížení životnosti izolace o 50 % [58]. S rostoucí teplotou se také zvyšuje rychlost oxidace polymerních látek. Z tohoto důvodu se zkoumá tzv. termooxidační stabilita při vyšších teplotách. Jelikož vlivem oteplení pevné složky dochází k nestabilitě v celulóзовém řetězci  $(C_6H_{10}O_6)_n$ . V důsledku tohoto procesu se dále rozpadají molekuly

celulózy  $C_6H_{12}O_6$  na molekuly jiných chemických sloučenin. Konkrétně se u minerálních olejů jedná o jednu molekulu oxidu uhličitého, jednu molekulu furanu a tři molekuly vody. Tuto nestabilitu podporuje a urychluje přítomnost mědi, která ve většině případů tvoří vinutí transformátoru. Pro potlačení katalytického účinku kovů se využívá dezaktivátorů a pasivátorů. Celý tento proces je označován jako **kyselá hydrolýza celulózy**, která je znázorněna na obr. 2.4. Podstatnou roli v tomto procesu hraje voda, která je obsažená v oleji. Díky které se mění glykosidická vazba z neutrální nebo mírně alkalické na kyselou, což vede k postupné ztrátě mechanických vlastností papíru. Kyselou hydrolýzu urychluje vodíkový kationt. [38, 39, 40]



Obr. 2.4 Kyselá hydrolýza celulózy (překresleno z [41])

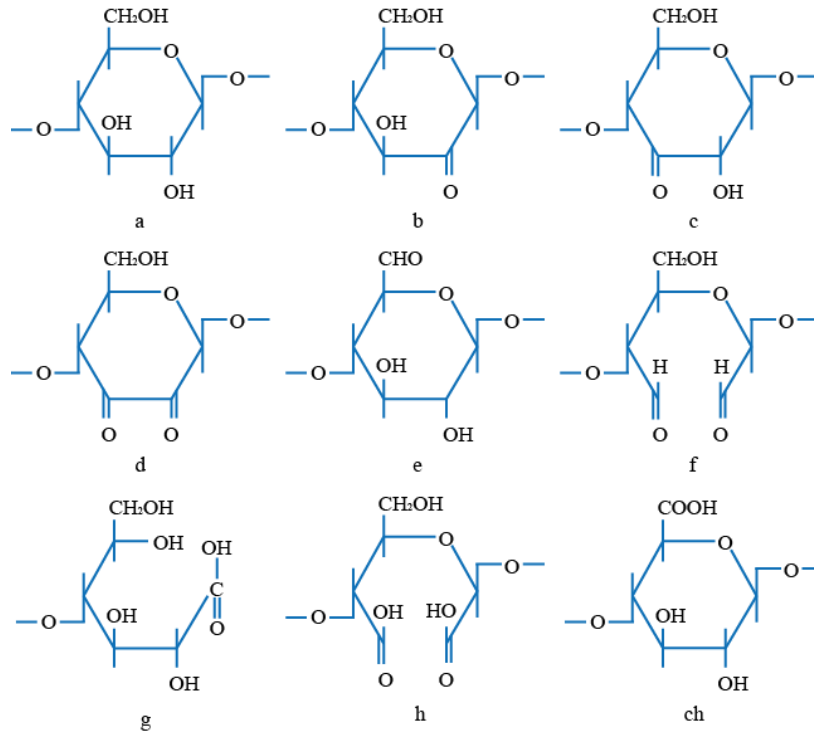
Zásadní látkou při chemické degradaci je **voda** a její celkový obsah v EIS. Působením vody dochází ke snížení životnosti papírové izolace, korozi vinutí a nádoby. V neposlední řadě množství vody v oleji ovlivňuje i elektrickou pevnost oleje, která se s rostoucí koncentrací vody snižuje. Doporučení je takové, že obsah vody by neměl být větší než 0,5 % z celkového objemu. Voda se v EIS transformátoru rozděluje v konstantním poměru podle aktuální teploty. Tedy čím je teplota vyšší, tím je více vody v oleji a méně v papíru. Při teplotách nad 60 °C začíná být množství vody v oleji významné. S rostoucí teplotou ještě více negativně ovlivňuje elektrické i neelektrické vlastnosti oleje a snižuje tepelnou odolnost celého EIS. Voda se vyskytuje v transformátoru v několika formách. Jako je voda volná, která



se nachází u dna nádoby a přímo neovlivňuje vlastnosti oleje. Následně může přecházet vlivem teploty a kvality EIS do oleje v podobě jiných druhů vody jako je např. rozpuštěná či emulgovaná voda. Rozpuštěná voda v oleji představuje značné riziko. Emulgovaná voda již zhoršuje dielektrické vlastnosti oleje, jelikož vytváří mikroskopické kapky vody v oleji. V neposlední řadě se v transformátoru vyskytuje reakční voda, která se dále modifikuje na rozpuštěnou vodu. [40, 42, 8]

Přítomnost vody v pevné složce EIS způsobuje zvýšení **vlhkosti izolace**. Ta se následně projevuje vyšší polaritou materiálu a zhoršením elektrických vlastností. Pokud se pozorují parametry papírové izolace, tak lze zjistit, že v sobě obsahuje cca 96 – 99 % vody, která se vyskytuje v celém transformátoru. V současné době se u nových vysušených transformátorů pohybuje obsah vody v papírové izolaci okolo 1 %. S dobou provozu podíl vody v papíru stoupá, a od hodnoty vyšší než 4,5 % lze tuto izolaci označit jako velmi vlhkou. Je potřeba izolaci celkově vysušit. Tato vlhkost vzniká např. působením zbytkové vlhkosti izolace vinutí, distančních vložek, dřevěných nebo profilových dílů, vnikem atmosférické vlhkosti netěsnostmi nádoby, nebo důsledkem degradace EIS. [2, 43, 44]

**Oxidace** EIS transformátoru probíhá v papíru. Při této reakci dochází ke strukturálním změnám papíru a následnému vzniku polárních zplodin. Je to způsobeno přítomností hydroxylové skupiny (OH a CH<sub>2</sub>OH) v celulóзовé molekule. Oxidační reakcí se rozumí odštěpení elektronů. V důsledku toho se zvyšuje nebo snižuje kladné či záporné oxidační číslo. S rostoucí teplotou vzrůstá rychlost oxidace. Celý proces oxidace celulózy je zobrazen na obr. 2.5. [8, 38]



Obr. 2.5 Oxidace (překresleno z [38])

Prací s oleji na bázi přírodních esterů je možné zjistit, že množství vody při dlouhodobé tepelné degradaci klesá. Tato skutečnost je vysvětlena tím, že oleje na bázi přírodních esterů mají několikanásobně vyšší schopnost pohlcovat vodu než minerální oleje a to v důsledku procesu hydrolýzy. Voda se spotřebovává v rostlinných olejích při reakcích řetězením nenasycených mastných kyselin. Potřebná voda se přemísťuje z papírové izolace do oleje do té doby, kdy nenastane rovnovážný stav. To má za následek, že dochází k transesterifikaci. Působením vysoké teploty dochází k esterifikaci mastných kyselin se silně reaktivní hydroxilovou skupinou OH, která je obsažena v celulóze. Proces pohlcování vody pomocí olejů na bázi přírodních olejů popisuje rovnice 2.12. [49]

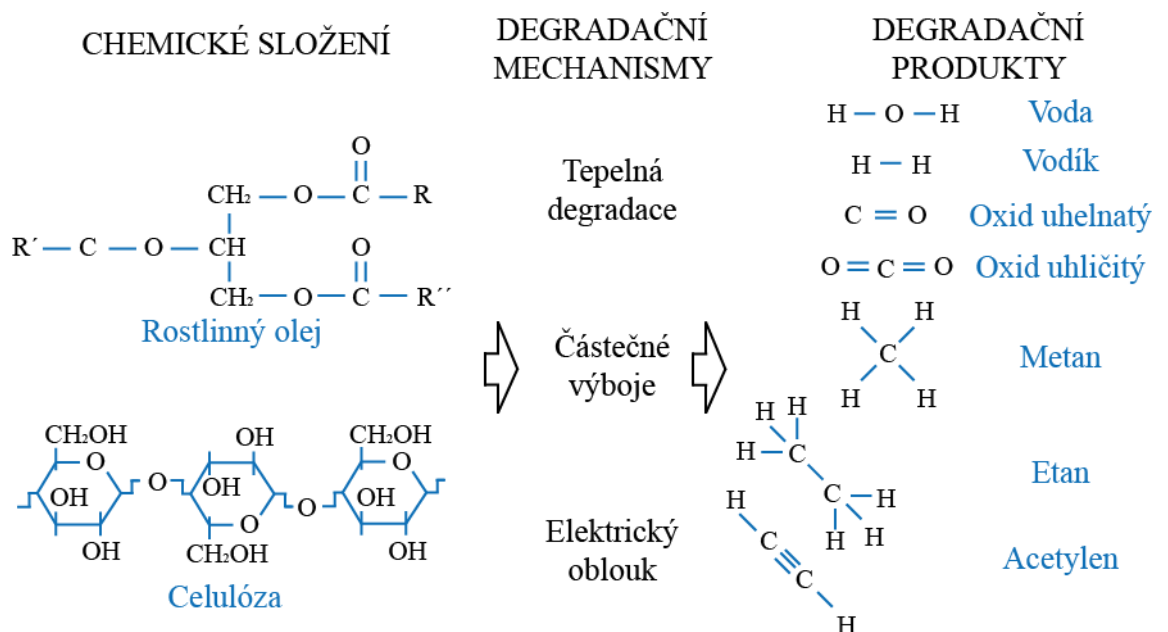
$$Sat(T) = 10^{\left(A - \frac{B}{T+273}\right)} \quad (2.12)$$

$Sat(T)$  velikost maximální saturace závislá na teplotě [mg/kg]

$T$  teplota izolační kapaliny [°C]

$A, B$  empiricky určené parametry [-]

Při chemická degradace EIS rostlinného oleje nebo oleje na bázi přírodních esterů vznikají jiné produkty díky jinému složení těchto látek. U rostlinných olejů figuruje základní triglyceridová skupina, kde R, R', R'' značí skupinu stejných nebo vzájemně odlišných mastných kyselin. Rozdílný je i obsah vody. Oleje na bázi přírodních esterů obsahují větší množství vody než oleje minerální. Tato skutečnost je v důsledku technologického zpracování oleje rostlinného původu. Dále je experimentálně dokázáno, že oleje na bázi přírodních esterů dosahují při tepelné degradaci několikanásobně vyššího obsahu plynů vodíku, oxidu uhelnatého, metanu a oxidu uhličitého. Na obr. 2.6 jsou zobrazeny pomocí chemických vzorců složení jednotlivých látek. [39]



Obr. 2.6 Chemické popsání složení EIS transformátoru při procesu stárnutí (překresleno z [8])

Produkce nových látek v EIS transformátoru podporuje vznik dalších reakcí jako např. kondenzace či polymerace. Ty následně ovlivňují vlastnosti oleje jako je číslo kyselosti, viskozita oleje nebo vytvoření nerozpustných látek. **Polymerace a polykondenzace** se vyskytují tehdy, pokud existují volné funkční skupiny, které umožňují reakci. Výsledkem je vznik trojrozměrných zesíťovaných struktur. To vede k tvrdnutí materiálu, pozdějšímu křehnutí, zhoršují se elektrické vlastnosti, roste navlhavost apod. Při stárnutí EIS se projevuje i jev zvaný **depolymerace**, jelikož vzniká při zvýšených teplotách a má za následek rozpad řetězců makromolekul. Tato reakce se objevuje u všech polymerů bez nutnosti přístupu kyslíku. [50]

### 3 Diagnostické parametry pro sledování stavu EIS olej-papír

Získání hodnot diagnostických parametrů pro EIS transformátoru lze realizovat dvěma způsoby a to on-line a off-line. Provádět pravidelně diagnostiku EIS je důležité pro včasné zaznamenání problému a tím předejít větším škodám na zařízení. V průběhu používání transformátoru se provádějí tři základní druhy diagnostiky. Jedná se o optickou, chemickou a elektrickou formu. Některé konkrétní diagnostické metody lze provádět jak ve stavu on-line i off-line. Převážná část se provádí ve stavu off-line. V tabulce 9 je uveden seznam diagnostických metod se způsobem diagnostiky.

Tab. 9 Diagnostické metody on/off-line [8]

| metoda     | název                                 | on/off-line diagnostika |
|------------|---------------------------------------|-------------------------|
| optická    | vizuální kontrola                     | on/off                  |
|            | termovizuální kontrola                | on/off                  |
| chemická   | analýza rozpuštěných plynů            | on/off                  |
|            | stupeň polymerace                     | off                     |
|            | obsah vody v oleji - vlhkost          | on/off                  |
|            | analýza furanů                        | off                     |
| elektrická | měření izolačního odporu              | off                     |
|            | měření vnitřní rezistivity            | off                     |
|            | měření ztrátového činitele a kapacity | off                     |
|            | analýza plynulosti frekvenční odezvy  | off                     |
|            | elektrická pevnost                    | off                     |
|            | měření částečných výbojů              | on/off                  |
|            | měření proudu a napětí                | on                      |
|            | měření teploty                        | on                      |

#### 3.1 Stupeň polymerace

Jedná se o parametr, který určuje aktuální stav degenerace pevné složky izolačního systému. K tomuto jevu dochází v důsledku zvýšeného obsahu vody, která ovlivňuje elektrické a neelektrické vlastnosti izolační kapaliny, následně i rychlost rozkladu celulózoového řetězce. Dále snižuje celkovou tepelnou odolnost. Výpočet stupně polymerace (PPS nebo DPP) se provádí podle vzorce 3.1. [30]

$$DPP = \frac{M_n(t)}{M_0} \quad (3.1)$$

$M_n(t)$  průměrná hodnota polymeru v čase t

$M_0$  molekulová hmotnost monomerní jednotky

Izolační papír, který se používá v transformátorech, obsahuje 90 % čisté celulózy. Důsledkem tepelné degradace se projevuje ztráta mechanických vlastností papíru. Při teplotě od 100 °C se tento děj začíná projevovat vývojem rozkladových plynů v důsledku probíhajícího procesu kyselého hydrolyzy celulózy, která je detailněji popsána v kapitole 2.1. Nové transformátorové papíry mají hodnotu stupně polymerace v rozmezí 800 až 1000. Doba provozu DPP snižuje. Nejnižší možná mezní hodnota pro DPP je 200. [30]

### 3.2 Analýza rozpuštěných plynů

Vznik plynů je způsoben především tepelnou a elektrickou degradací. Ty následně vyvolávají chemické procesy, které způsobují rozklad pevné izolace, jelikož je složena z polymerních řetězců. Tento děj probíhá v teplotním rozmezí mezi 105 °C a 300 °C. Produkty, které vznikají, jsou oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vody. Zároveň vznikají uhlovodíkové plyny a furanové sloučeniny. [51]

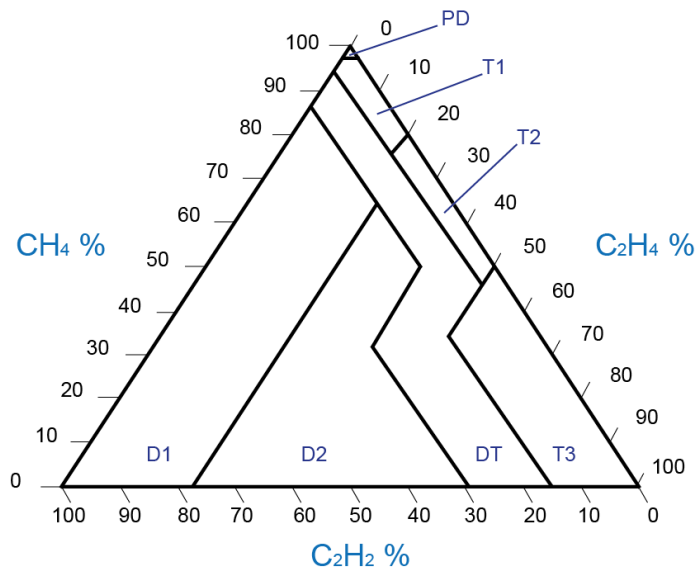
Pro minerální oleje je vznik plynů při provozu transformátoru popsán v normě IEC 60 599:1999, kde je popsán vyhovující poměr vzniklých plynů pomocí Duvalova trojúhelníku. Také jsou zde popsány i poměry plynů, které mohou odhalit poruchu zařízení a to na základě koncentrace plynů  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_4$ . Z následujících rovnic 3.2, 3.3, 3.4 je vyjádřeno procentní množství plynů.

$$\%C_2H_2 = \frac{100 \cdot C_2H_2}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad (3.2)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100 \cdot C_2H_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad (3.3)$$

$$\%CH_4 = \frac{100 \cdot CH_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad (3.4)$$

Procentuální výsledky z rovnic se vynesou do trojúhelníkového souřadného systému Duvalova trojúhelníku, který je zobrazen na obr. 3.1. Tento trojúhelník se rozkládá do 7 částí. Každá z těchto částí popisuje jednu ze 7 poruch. [52]



Obr. 3.1 Duvalův trojúhelník (překresleno z [52])

- PD částečné výboje
- T1 tepelná porucha do 300 °C
- T2 tepelná porucha 300 °C – 700 °C
- T3 tepelná porucha nad 700 °C
- DT tepelná porucha nebo elektrický oblouk
- D1 výboj nízké energie
- D2 výboje vysoké energie

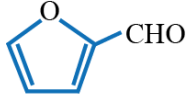
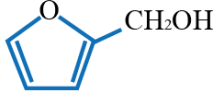
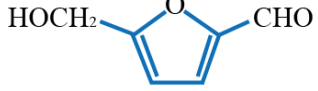
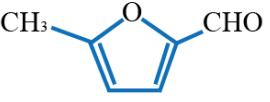

### 3.3 Obsah vody v oleji - vlhkost

Vlhkost je jedním z hlavních činitelů, jenž nepříznivě ovlivňuje stárnutí EIS. Způsobuje snižování elektrické pevnosti oleje. Do EIS transformátoru se vlhkost může dostat dvěma způsoby. Prvním způsobem je atmosférická vlhkost, která se označuje jako externí zdroj. Je způsobena nedostatečným hermetickým uzavřením nádoby transformátoru. Z praxe je uváděno, že se jedná o jednu z nejčastějších příčin vzniku vlhkosti [53]. Druhým zdrojem je tzv. interní. Sem patří zbytková vlhkost v papírové izolaci. Tato vlhkost je způsobena nedostatečným vysušením při výrobě. Do interních zdrojů se řadí vlhkost, která vzniká při teplotní degradaci v rámci polykondenzačních reakcí jako produkt oxidace. Vlhkost je zdrojem polárních částic, které negativně zvyšují vodivost materiálu. Tyto polární částice jsou v izolaci na bázi celulózy vázány ve formě vodních kapek, které jsou vytvořeny rozpadem celulózy při tepelné degradaci. Vzniklou vodu je potřeba odstranit vysušením. Při provozu transformátoru je voda v EIS rozložena nerovnoměrně a migruje mezi pevnou a kapalnou složkou v závislosti na teplotě. [2, 29]

V modelovém případě je obsaženo v EIS výkonového transformátoru pro hladinu VVN přes 60 tun oleje a 8 tun papíru. Vlhkost v oleji se stanovuje poměrovým vztahem mg vody v kg oleje. Základní jednotkou je ppm. Existují dva základní parametry pro stanovení mezní vlhkosti, jeden pro olej a druhý pro papír. První parametr udává limitní hodnotu pro zhoršený stav 25 ppm. Pro modelový případ to znamená, že při zhoršeném stavu je v celém transformátoru obsaženo 2 kg vody. Druhý parametr je vztažen na vlhkost papíru, která je vztažena k procentuální hodnotě hmotnosti izolace. Limitní hodnota pro vlhkost papíru jsou 4 %. V modelovém příkladu se jedná o 300kg vody, jenž může být obsažena v papírové izolaci. Z této skutečnosti je patrné, že pevná složka izolace akumuluje vlhkost a kapalná složka zde figuruje jako přenosné médium.[53]

### 3.4 Furany

Furan je monosacharid, který vzniká hydrolýzou celulózy a hemicelulóz. Je to produkt degradace, který iniciuje další štěpení. Tato degradace se za provozu transformátoru zjišťuje nepřímými metodami a to z transformátorového oleje. Kdy se zkoumá složení oleje a rozpuštěných látek, které vznikly v důsledku stárnutí. Přítomností furanu v oleji lze jednoznačně tvrdit, že se v daném transformátoru odehrává proces stárnutí. Obsah furanů se měří pomocí vysoce účinné kapalně chromatografie nebo plynové chromatografie. Na obr. 3.2 jsou zobrazeny chemické molekuly furanových sloučenin. [54, 55]

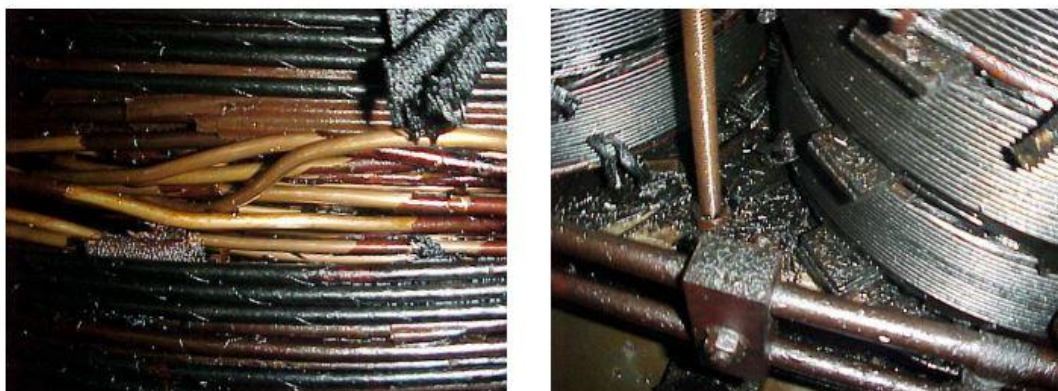
|   |                                    |
|---|------------------------------------|
|  | <b>2-Furfural</b>                  |
|  | <b>2-Furfurol</b>                  |
|  | <b>5-Hydroxy methyl-2-Furfural</b> |
|  | <b>5-Methyl-2Furfural</b>          |
|  | <b>2-Acetylfuran</b>               |

Obr. 3.2 Sloučeniny furanu, které jsou detekovány v oleji transformátoru (překresleno z [54])

Furanové sloučeniny jsou bezbarvé vysoce těkavé hořlavé a toxické látky. Vznik těchto látek je podpořen dlouhodobým zahříváním. Přítomnost furanu v oleji má spojitost se stupněm polymerace (DPP), jelikož oba procesy vznikají v pevné složce EIS transformátoru. Všeobecně je vznik furanu spojen s nerovnoměrným stárnutím pevné složky EIS transformátoru. Stárnutí papíru je ovlivněno např. teplotou, cirkulací vlhkosti, obsahem kyslíku a dalšími podmínkami. Pokud se uvažuje o systému olej-papír, kde je poměr těchto složek 20:1, tak mají hladiny furanu následující význam, který je uveden v tab. 10. Na obr. 3.3 je zobrazena papírová izolace výkonového transformátoru v havarijním stavu. [56]

**Tab. 10 Souvislost hodnot obsahu furanu a DPP na životnost EIS [56]**

| obsah furanu (ppm) | DPP        | význam               |
|--------------------|------------|----------------------|
| 0 – 0,1            | 1200 – 700 | zdravý transformátor |
| 0,1 – 1,0          | 700 – 450  | mírné zhoršení       |
| 1,0 – 10           | 450 – 250  | rozsáhlé zhoršení    |
| >10                | <250       | havarijní stav       |



**Obr. 3.3 Stav papírové izolace v havarijním stavu (převzato z [56])**

### 3.5 Izolační odpor

Zjištění hodnoty izolačního odporu je jednou z nejstarších diagnostických metod, které jsou zavedeny pro výkonové transformátory. Tato naměřená hodnota je důležitá, jelikož díky ní lze nalézt nejslabší místo EIS. Pokles izolačního odporu je spojen s vlhkostí a nečistotami. Při měření se odečítají dvě hodnoty absorpčního proudu po připojení napětí k měřenému zařízení. První hodnota v 15. sekundě a druhá v 60. sekundě. Izolační odpor získaný v 60. sekundě je absolutní hodnotou. Polarizační index  $p_{i1}$  je pak poměr těchto dvou naměřených proudů. [57]

$$p_{i1} = i_{15}/i_{60} = R_{iz60}/R_{iz15} [-] \quad (3.5)$$



Doporučené měřicí napětí je 2,5 kV stejnosměrného charakteru a nemělo by překročit jmenovité napětí soustavy. Proud protékající izolací má tři složky. Kapacitní proud velmi rychle zaniká a je vyvolán vnitřním odporem zdroje. Absorpční proud je způsoben polarizací dielektrika. Vodivostní proud protéká izolací a způsobuje činné ztráty. Hodnoty izolačního odporu se pohybují řádově v  $M\Omega$ . Dále se z měření izolačního odporu získává **časová konstanta  $\tau$** , která také charakterizuje izolační systém. Tato časová konstanta se vztahuje ke všem zařízením bez ohledu na jejich velikost, napětí, výkon i typ. [29]

$$\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} \quad (3.6)$$

$R_{iz60}$  izolační odpor, který je naměřen v 60. sekundě [ $M\Omega$ ]

$C_{50}$  kapacita izolace při 50 Hz [ $\mu F$ ]

$\tau$  časová konstanta [s]

Naměřené hodnoty se dále buď porovnávají s hodnotami, které byly naměřeny v předchozím měření nebo s hodnotami nového stroje. Pokud se změna hodnot mezi měřeními liší o více jak 40 %, je potřeba najít příčinu. Minimální hodnota polarizačního indexu u nových strojů není menší než 1,7. U provozovaných strojů pak není menší než 1,3. Časová konstanta se dle provozního napětí pohybuje v rozmezí 5 s až 10 s. [29]

### 3.6 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita je převrácená hodnota elektrické vodivosti. Je závislá na několika faktorech, jako je např. vlhkost, nečistoty, teplota a velikost měřicího napětí. S rostoucí teplotou vnitřní rezistivita klesá a hodnota elektrické vodivosti roste. To se děje v důsledku zmenšení viskozity a zvýšené pohyblivosti iontů. Měření probíhá při 90 °C. Neuspokojivé měření vnitřní rezistivity vzniká v důsledku přítomnosti vody v izolantu. Proto je toto měření důležité, jelikož voda podporuje stárnutí EIS. Měření vnitřní rezistivity se provádí pomocí pikoampérmetru, který měří velikost protékaného proudu vzorkem. Zkušební napětí pro měření vnitřní rezistivity je stanoveno příslušnou normou přesně pro určitý druh izolantu. Pokud není uvedeno jinak, tak intenzita pole je  $0,25 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Kladný potenciál je připojen k venkovní elektrodě měřicí nádoby. Doba elektrizace vzorku, pokud není dáno normou jinak, je stanovena na 1 minutu po připojení napětí. Následně se vypočte z odečtené hodnoty odporu vnitřní rezistivita podle rovnice 3.7. [29]

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \quad (3.7)$$

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\rho_v$        | vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ] |
| $C_0$           | kapacita prázdné měřicí nádoby [F]       |
| $R_v$           | vnitřní elektrický odpor [ $\Omega$ ]    |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua $8,85 \cdot 10^{-12}$  |

### 3.7 Číslo kyselosti

Pro nové izolační oleje jsou stanoveny mezní limity pro přítomnost kyselých látek a to z toho důvodu, že přítomnost těchto látek udává míru stárnutí oleje a je úzce spojena s oxidací. Podle obsahu kyselých látek v oleji se posuzuje míra degradace oleje. Číslo kyselosti tedy udává množství hydroxidu draselného KHO v mg potřebného pro neutralizaci 1 gramu oxidačně zestárlého oleje. [58]

Pro stanovení čísla kyselosti se používají dvě metody a to potenciometrická metoda a stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B. Při užití potenciometrické metody znázorňuje číslo kyselosti množství báze v mg KOH/g vzorku, která je potřeba k neutralizování roztoku, který se titruje do hodnoty 11,5 pH [59]. Stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B je založeno na titraci kyselých sloučenin alkoholickým roztokem hydroxidu draselného [29]. Číslo kyselosti se následně vypočítá podle rovnice 3.8. Výsledná hodnota je stanovena pomocí aritmetického průměru ze dvou souběžných měření.

$$\check{C}K = \frac{a \cdot f \cdot 56,11 \cdot N}{v} \quad (3.8)$$

|              |  |
|--------------|--|
| $\check{C}K$ | číslo kyselosti [mg KOH/g]                   |
| $a$          | spotřeba roztoku 0,1 M KOH v $cm^3$          |
| $f$          | faktor 0,1 M KOH                             |
| $N$          | molarita titračního alkoholového roztoku KOH |
| $v$          | navážka vzorku izolačního roztoku [g]        |

S číslem kyselosti souvisí číslo zmýdelnění, které udává množství hydroxidu draselného v mg, potřebné k neutralizaci volných kyselin a ke zmýdelnění esterů obsažených v 1 g látky. Toto číslo je vyšší než číslo kyselosti. [29]

### 3.8 Ztrátový činitel a relativní permitivita

**Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$**  vyjadřuje dielektrické ztráty, které se realizují pomocí energie ve střídavém poli. Tato energie se v materiálu přeměňuje na teplo. Ztrátový činitel je jedním z ukazatelů stavu EIS transformátoru. Hodnota  $\text{tg } \delta$  reaguje na změny v případě degenerativních pochodů EIS. U nových olejů je minimální obsah vlhkosti a nečistot, které by mohly vzniknout v důsledku vyšší polarizace EIS. Proto je hodnota ztrátového činitele velmi nízká a její minimální hodnota je určena normou. Při srovnání hodnot  $\text{tg } \delta$  pro minerální oleje a oleje na bázi přírodních esterů je zaznamenáno zvýšení ztrátového činitele u olejů na bázi přírodních esterů, jelikož se jedná o látku, která je více polární, než minerální oleje. U minerálního oleje, který je v čistém stavu lze tvrdit, že jsou dielektrické ztráty dány jen vodivostí dielektrika. Vodivost je malá, a tak je malý i ztrátový činitel. Hodnota ztrátového činitele je závislá na teplotě a frekvenci. Vlivem teploty  $\text{tg } \delta$  stoupá v důsledku polarizačních ztrát. Změna velikosti ztrátového činitele vypovídá o ohřevu oleje. Pokud je  $\text{tg } \delta$  dlouhodobě sledován, tak je možné předvídat přeskok. Měření ztrátového činitele se provádí např. pomocí Scheringova můstku. Tato metoda je více popsána v kapitole 4.1.1. [8, 29]

**Relativní permitivita  $\epsilon_r$**  určuje míru polárnosti látky. Tato polárnost zvyšuje hodnotu ztrátového činitele. Čím větší permitivita, tím je větší i polárnost látky a zároveň se zvyšuje i ztrátový činitel. Bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou permitivita klesá. Ovšem se zvyšujícím se stupněm provozního stárnutí permitivita roste. U olejů pro výkonové transformátory se obvykle pohybuje v rozmezí 2 až 3. Tato hodnota informuje o čistotě kapaliny a o vlivu elektrického pole na elektrické namáhání. Pokud při porovnávání hodnot permitivity u minerálního oleje a u oleje na bázi přírodních esterů lze dojít k závěru, že minerální olej má zhruba o jednu třetinu nižší hodnotu permitivity než olej na bázi přírodních esterů. Hodnotu relativní permitivity lze získat při měření ztrátového činitele a dopočítává se dle vzorce 3.9. [8, 29]

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (3.9)$$

$C_0$  kapacita prázdné měřicí nádoby [F]

$\epsilon_r$  relativní permitivita vakua [-]

$C_x$  kapacita plné měřicí nádoby [F]

### 3.9 Elektrická pevnost a průrazné napětí

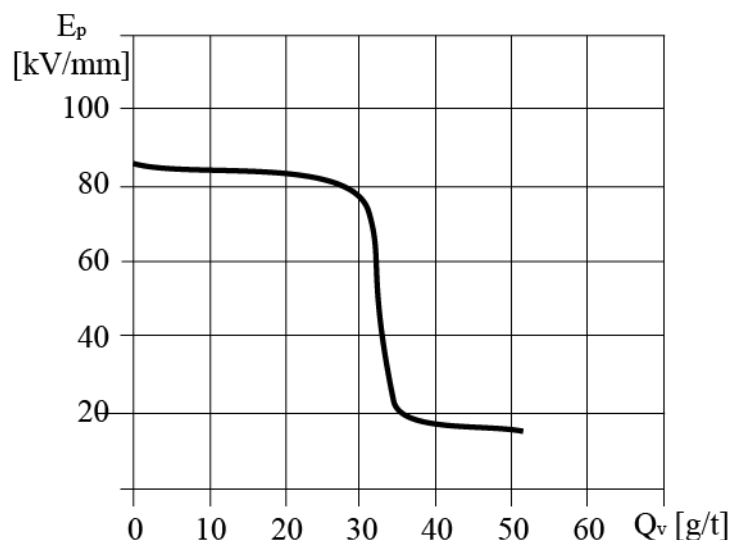
Elektrická pevnost je jedním z nejdůležitějších parametrů izolantu. Určuje použitelnost izolantu v praxi. Při používání materiálu s nevyhovující hodnotou elektrické pevnosti může dojít k úplnému zničení zařízení v důsledku přeskoků v kapalině, nebo k průrazu u pevných izolantů. U pevné složky EIS transformátoru je elektrická pevnost izolantu závislá na tloušťce, teplotě propustnosti a vlhkosti. Její hodnota stoupá s nepropustností papíru. U olejů je hodnota  $E_p$  závislá na obsahu vody, nečistot, produktů stárnutí a obsahu plynů. Elektrická pevnost je definována jako poměr průrazného napětí a vzdálenosti zkušebních elektrod, dle rovnice 3.10. Průrazné napětí je definováno jako nejmenší napětí naměřené při zkoušce v okamžiku, kdy vznikl první výboj mezi elektrodami. Způsob měření průrazného napětí je detailněji popsán v kapitole 4.1.3. [2, 29] Na obr. 3.4 je zobrazena závislost obsahu vody na elektrické pevnosti.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (3.10)$$

$E_p$  elektrická pevnost [ $V \cdot m^{-1}$ ]

$U_p$  průrazné napětí [V]

$d$  vzdálenost mezi elektrodami [m]



Obr. 3.4 Závislost elektrické pevnosti na obsahu vody v oleji (překresleno z [29])

Z měření průrazného napětí se následně získá aritmetickým průměrem střední hodnota průrazného napětí, směrodatná odchylka a variační koeficient dle následujících rovnic 3.11, 3.12, 3.13. Pokud je hodnota variačního koeficientu vyšší jak 20 %, se měření musí zopakovat s novým izolantem. Pokud ani po opakovaném měření není variační koeficient menší než 20 %, izolant nevyhověl. [2, 29]

$$\overline{U_p} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \quad (3.11)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{U_p} - U_{pi})^2}{n-1}} \quad (3.12)$$

$$v = \frac{s}{\overline{U_p}} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

|                  |   |
|------------------|---|
| $\overline{U_p}$ | střední hodnota průrazného napětí [kV]    |
| $U_{pi}$         | průrazné napětí jednotlivých průrazů [kV] |
| $s$              | směrodatná odchylka [kV]                  |
| $n$              | počet uskutečněných pokusů měření         |
| $v$              | variační koeficient [%]                   |

### 3.10 Viskozita

Viskozita je fyzikální veličinou, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti (gradientem) v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění kapaliny. Je to míra vnitřního tření kapaliny. Zmenšení viskozity může mít důsledky jako je zvýšení průtokových ztrát nebo zhoršení mazání. Viskozita je silně závislá na teplotě. Tato závislost lze vyjádřit pomocí **viskozitního indexu (VI)**. Čím víc je tento index vyšší, tím je závislost viskozity na teplotě menší a kapalina lze používat pro větší rozmezí teplot. Výpočet VI se provádí pomocí rovnice 3.14. Nárůstem viskozity se projevuje stárnutí a oxidace izolačního oleje. [58]

$$VI = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 \quad (3.14)$$

|     |   |
|-----|---|
| $L$ | viskozita referenčního oleje při 40 °C, viskozita takového oleje při 100 °C je stejná jako měřeného oleje při stejné teplotě [ $mm^2 \cdot s^{-1}$ ]          |
| $U$ | viskozita zkoušeného oleje při 40 °C [ $mm^2 \cdot s^{-1}$ ]  |
| $H$ | viskozita referenčního oleje s VI=100 při 40 °C, viskozita takového oleje je při 100 °C stejná jako měřeného oleje při stejné teplotě [ $mm^2 \cdot s^{-1}$ ] |

Rozlišují se dva druhy viskozit, dynamická a kinetická. **Dynamická viskozita** vyjadřuje sílu, která je zapotřebí, aby se vrstva o ploše  $1m^2$  posunula proti stejné vrstvě ve vzdálenosti 1 m o 1 m ve vodorovném směru. Její hodnota se vypočítá dle rovnice 3.15. **Kinetická viskozita** je určena dobou průtoku daného objemu kapaliny, který je způsoben gravitační

silou kalibrovaným skleněným otvorem viskozimetru při známé teplotě. Z tohoto měření se hodnota kinetické viskozity stanoví pomocí rovnice 3.16. [29]

$$\eta = v \cdot \rho \cdot 10^3 \quad (3.15)$$

$$v = C \cdot t \quad (3.16)$$

|        |  |
|--------|--|
| $\eta$ | dynamická hustota [Pa·s]   |
| $v$    | kinetická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]                                   |
| $\rho$ | hustota měřené kapaliny při teplotě určování viskozity [ $g \cdot cm^{-3}$ ] |
| $C$    | konstanta viskozimetru [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]                                |
| $t$    | střední hodnota doby průtoku viskozimetrem [s]                               |

### 3.11 Bod tuhnutí a bod vzplanutí

**Bod tuhnutí a bod tekutosti** jsou důležité parametry oleje z důvodu potřebného zjištění chování kapalných izolantů při nízkých teplotách. Tento údaj je podstatný hlavně při spouštění transformátoru při extrémně nízkých teplotách okolí. Teplota tuhnutí udává hodnotu, kdy olej ztuhne. Vzroste jeho viskozita a ubývá kapalně fáze. Bod tuhlosti se zjišťuje pomocí zahřátí zkoumané kapaliny po dobu 15 minut na 50 °C, která se následně předepsanou rychlostí ochlazuje a v předepsaných teplotních intervalech se posuzuje tekutost kapaliny. Nejnižší teplota, kdy je pozorován pohyb kapaliny, je označena jako **bod tekutosti**. V měření se pokračuje dál, až do určení bodu tuhlosti. Kdy se při každém poklesu teploty o 2 °C nahne s nádobou s olejem. Pokud se při naklonění nádoby olej nepohne 5 sekund, tak je stanoven bod tuhlosti.[29]

**Bod vzplanutí a hoření** se určuje z hlediska požární bezpečnosti. Hoření je chemická reakce, při které částice hořlavé látky oxidují za vzniku tepla a světla. Hoří látka v plynném skupenství, tedy její páry. K hoření je nutné vytvoření směsi hořlavých par se vzduchem za přítomnosti zdroje tepla. Nebezpečnost hořlavých látek se určuje podle bodu vzplanutí. Bod vzplanutí tzv. Flash point je teplota, při které se po přiblížení plamene ke zkušební nádobě s olejem jeho páry vznítí, ale nezačnou trvale hořet. Při měření flash pointu je olej postupně zahříván a v určitých intervalech se nad hladinou pohybuje s malým plamenem. Nejnižší teplota, při které olejové páry vzplanou, je označován jako bod vzplanutí. U kapalných izolantů by hodnota flash pointu měla být vyšší jak 150 °C. Vzorek určený pro

měření nesmí obsahovat vodu. Dále lze určit **bod hoření**. Je to taková teplota, při které směs par kapaliny a vzduchu trvale hoří alespoň 5 sekund i po oddálení pomocného plamene. [29, 58]

### 3.12 Oxidační stabilita a obsah inhibitorů

Jako oxidační stabilita je označována odolnost látky proti stárnutí vlivem účinku kyslíku, tepla, světla a různých chemických látek. Uvádí se, že při teplotě nad 70 °C se rychlost oxidace zvýší dvojnásobně při každém zvýšení teploty o 10 °C. [58]

Při zkouškách oxidační stability se olej namáhá zvýšenými dominantními činiteli, které vyvolávají stárnutí. Výsledky zkoušky se porovnávají s původním stavem měřené kapaliny. Sleduje se stupeň zhoršení elektrických, fyzikálních nebo chemických vlastností. Pro hodnocení se sledují parametry, které jsou na průběh stárnutí citlivé. Mezi ně patří ztrátový činitel, mezipovrchové napětí na rozhraní voda-olej, číslo kyselosti, barva kapaliny. Při realizaci zkoušky oxidační stability pomocí zrychleného stárnutí získávané výsledky nedávají přesnou výpověď o chování kapalného izolantu v reálném provozu. [29]

Pro zvýšení oxidační stability se do izolačních olejů přidávají **antioxidanty**. Podle teplotní účinnosti se rozdělují antioxidanty na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní antioxidanty lze aplikovat pro teploty do 120 °C, poté se jejich antioxidační schopnost snižuje. Vysokoteplotní antioxidanty lze aplikovat až pro teploty 200 °C. Pro izolační oleje se používají nízkoteplotní antioxidační přísady, jako jsou fenolické antioxidanty. Tyto sloučeniny mají vlastnost vytvářet velmi stabilní radikály. Po vyčerpání antioxidantů ovšem dochází opět k oxidační degradaci. Proto je nutné pozorovat obsah antioxidantů. [60]

Zvýšit odolnost vůči oxidaci také lze pomocí **inhibitorů**. Jejich přítomnost v oleji transformátoru, podobně jako antioxidanty, zpomaluje proces stárnutí. Obecně je stanoveno množství inhibitoru na 0,3%<sub>hmot.</sub> Mezi používané inhibitory patří fenolický nebo aminový typ inhibitoru. Konkrétně se jedná o diterciální butylparakrezol (DBPC), paraoxidifenylamin, fenyl-β-naftylamin. Určování množství u nových ale i u používaných olejů se provádí pomocí několika metod jako je infračervená spektroskopie, chromatografická metoda na tenké vrstvě, nebo kalorimetrická metoda. [29]

### 3.13 Biodegradabilita

Biodegradace se vyskytuje u organických materiálů, které jsou složeny ze sloučenin přírodních nebo syntetických uhlovodíků. Ve skutečnosti je biodegradace biologickou oxidací. Biologická oxidace je známa pod pojmem biologická odbouratelnost. Tento děj popisuje rozložitelnost látky biologickými reakcemi např. působením mikroorganismů (bakterie, plísňe) v přírodě na zdraví a přírodě nezávislé složky. Proces v sobě zahrnuje několik bio-oxidačních kroků, při kterých se uplatňují např. alkoholy, karboxylové kyseliny a oxid uhličitý. Během této reakce mimo jiné vznikají i aminokyseliny a proteiny. To umožňuje další růst mikroorganismům, které urychlují biologickou odbouratelnost materiálu. Jako zdravotně nezávadná je považována složka uhlíku, vodíku a kyslíku. Biologická odbouratelnost minerálních olejů je velmi nízká. Podstatně lepších výsledků dosahují syntetické oleje a modifikované rostlinné oleje. [61, 62]

Pro měření biologické odbouratelnosti látek se v praxi používá více postupů. Některé z nich zároveň vyhovují i české normě ČSN EN 61099. OECD 301 A-F organizace OECD je jednou z těch metod, která vyhovuje české technické normě. Základem většiny zkoušek biodegradability materiálu je porovnávání zkoumaného vzorku se vzorkem referenčním. Do zkoumaného vzorku se přidá bakterie. Dále se vzorek sleduje po dobu 21 až 28 dní, dle příslušného testu. Následně se porovnává referenční vzorek se zkoumaným. [62, 63]

Při experimentu [62] se získané výsledky dají interpretovat následovně. Minerální oleje a jejich směsi se biologicky rozložily ze 35 až 40 %. Syntetické oleje vykazují 70 - 90% biologickou odbouratelnost a rostlinné oleje mají 90 – 100% biodegradabilitu.

### 3.14 Mezipovrchové napětí

Definice mezipovrchového napětí je dána jako síla, která působí na jednotu délky v povrchu kolmo k této délce a tangenciálně k ploše povrchu. Stanovením hodnoty mezipovrchového napětí na rozhraní voda-olej lze získat důležité hodnoty, které se vztahují ke stárnutí oleje. Proto lze touto metodou citlivě určit počátky stárnutí oleje. To je možné díky vzniku organických látek v oleji s karboxylovou nebo hydroxylovou skupinou, které se dále projevují jako rozpustné polární nečistoty. K měření mezipovrchového napětí na rozhraní voda-olej se používají dvě metody a to měření síly a kapková metoda. „*Konkrétně se měří síla, která je potřebná k odtržení platinového prstence nebo tenké skleněné destičky*“



z kapalného izolantu.[29]“ Při užití kapkové metody se měří hmotnost vyteklého objemu z kapiláry do vzduchu a do kapaliny. Měření se alespoň jednou opakuje a hodnota mezipovrchového napětí se získává ze vztahu 3.17. [29]

$$\sigma_{vo/ol} = V_{vo/ol}(\rho_{vo} - \rho_{ol}) \frac{\sigma_{vo/vz}}{\rho_{vo} V_{vo/vz}} \quad (3.17)$$

|                  |   |
|------------------|---|
| $\sigma_{vo/ol}$ | povrchové napětí voda-kapalina [ $N \cdot m^{-1}$ ]                     |
| $\sigma_{vo/vz}$ | povrchové napětí voda-vzduch [ $N \cdot m^{-1}$ ]                       |
| $V_{vo/ol}$      | objem jedné kapky vody vyteklé do měřeného kapalného izolantu [ $m^3$ ] |
| $V_{vo/vz}$      | objem jedné kapky vody vyteklé do vzduchu [ $m^3$ ]                     |
| $\rho_{vo}$      | hustota vody při měření [ $kg \cdot m^{-3}$ ]                           |
| $\rho_{ol}$      | hustota měřeného izolačního oleje [ $kg \cdot m^{-3}$ ]                 |

### 3.15 Další parametry

Dále se zkoumá např. **barva**. Ta je ukazatel jakosti kapalného izolantu. Negativně se vyhodnocuje přítomnost cizích částic, jelikož mohou ovlivnit funkčnost oleje. Barva je prvním kritériem, které se posuzuje u kapaliny. Dle barvy lze určit aktuální stav ihned po odběru. Barva oleje se určuje orientačně porovnáním vzorku s barevnými standardy. Výsledek je označen číslem. Nové oleje mají světlou barvu. Stárnutím tmavnou. Na základě zjištění barvy ovšem nelze zjistit stupeň zestárnutí. Změnou barvy se diagnostikuje první stupeň oxidačního stárnutí izolační kapaliny. Určení barvy se provádí buď subjektivně anebo objektivně, pomocí kalorimetru. [29]

Pro diagnostiku stavu oleje je podstatné určit **množství nečistot a kalů**. Nečistoty se do kapaliny mohou dostat během skladování a transportu. Před naplnění transformátoru olejem dochází k odstranění těchto částic pomocí soustavy filtrů. Částice se zachycují na membránových filtrech s velikostí pórů  $0,8 - 5 \mu m$ . Velikost těchto částic se určuje mikroskopem. Počet se stanovuje ve  $100 \text{ cm}^3$  kapalného izolantu. Moderní metody využívají automatické čítače částic. Dále se v oleji mohou vytvořit kaly a usazeniny, které nelze zachytit filtrací ani odstředěním. Tyto částice zhoršují přestup tepla a brzdí cirkulaci oleje, jelikož znečišťují olejová potrubí. Kaly a usazeniny vznikají v důsledku oxidačního stárnutí. Přítomností těchto látek zvyšuje schopnost izolačního oleje pohlcovat vodu a urychluje stárnutí EIS. Ovlivňují sledované veličiny jako je mezipovrchové napětí voda-olej, vnitřní rezistivitu, ztrátový činitel, permitivitu. Stanovení rozpustných kalů se provádí u testovaného

vzorku po promíchání vizuálně. Tento vzorek je v temnu po dobu 24 hodin a je zředěn n-heptanem. Přítomnost kalů se pozná na základě přítomnosti nerozpuštěných zbytků v n-heptanu. [29]

U minerálních olejů se dále sleduje přítomnost organo-sírných sloučenin. Při zpracování ropy se sice **obsah síry** upravuje, ale je nutné sledovat obsah síry z důvodu jejich korozivních účinků. Pro stanovení obsahu síry se používají oxidační metody a rentgenová fluorescenční spektroskopie. [29]

V minulosti se ve výkonových transformátorech objevovaly i **polycyklické aromáty a polychlorované bifenyly**. Jelikož se zjistilo, že polycyklické aromáty jsou karcinogenní, tak se jejich obsah snížil. V současné době se polycyklické aromáty ani polychlorované bifenyly již neobjevují v žádném výkonovém transformátoru. [29]

## 4 Experimentální část

Jedním z cílů práce je uskutečnit experiment zrychleného stárnutí na vybraných vzorcích olejů, které jsou určeny pro elektroizolační systém olej-papír. Zkoumanými vzorky byly různé druhy olejů. Minerální olej Shell DIALA DX figuroval v tomto experimentu jako referenční. Dále byl zvolen již v praxi zavedený syntetický olej na bázi organických esterů MIDEL 7131, který byl doplněn rostlinnými oleji. To bylo z důvodu pokusu o nalezení další z alternativ, která by mohla v budoucnosti nahradit minerální oleje. Vlastní experiment byl prováděn na řepkovém oleji s obsahem inhibitoru, rýžovém oleji, palmovém oleji a olivovém oleji.

Pro experiment byly použity následující rostlinné oleje. **Řepkový olej** se získává ze semen řepky olejné (latinsky *Brassica napus napus*). A to lisováním buď zastudena, nebo pomocí organických rozpouštědel. Pokud je užitá metoda s organickými rozpouštědly, tak je v oleji nadbytečný fosfor. **Rýžový olej** se získává z rýžových otrub asijské nebo africké rýže (latinsky *Oryza sativa*, *Oryza glaberrima*) pomocí rafinace. Je odolný velmi vysokým teplotám (až 215 °C), poskytuje dobrou oxidační stabilitu a obsahuje větší objem mono-nenasycených mastných kyselin. **Palmový olej** se získává z oplodí palmy olejné (latinsky *Elaeis guineensis*). Hlavní složkou je kyselina palmitová a laurová. Při pokojové teplotě se z palmového oleje stává bílá až nažloutlá hmota. Taje při teplotách vyšších jak 35 °C. Je vysoce stabilní vůči oxidaci. **Olivový olej** se získává lisováním plodů olivovníku

evropského (latinsky *Olea europia*). Podíl kyseliny olejové, která je v tomto oleji obsažena, se pohybuje v rozmezí 56-85 %. Obsah této kyseliny se liší podle prostředí. Má velký podíl mono-nenasycených mastných kyselin.

Existují tři druhy stárnutí a to oxidační, termooxidační a tepelné. Experiment zrychleného stárnutí byl prováděn tepelným stárnutím. Vybrané oleje byly skladovány v tmavých skleněných lahvích se zabroušeným hrdlem. Tmavé sklo bylo použito, aby světlo neovlivňovalo výsledky měření. Tyto nádoby byly dostatečným způsobem uzavřeny proti přístupu vzduchu, aby nedocházelo k oxidaci oleje a následné podpoře rychlosti degradace oleje. Při tomto pokusu byly simulovány podmínky při provozu, tedy bylo nutné zabránit přístupu kyslíku k oleji. Parametry byly měřeny v předem určených časových intervalech, které stanovila norma ČSN EN 60247. Přesněji jsou definované v kapitole 4.1.1. Pro každý interval byl určen jeden vzorek, který byl otevřením znehodnocen, jelikož se k němu dostal vzduch. Dielektrické kapaliny se zahřívaly po dobu experimentu v horkovzdušné peci při teplotě 140 °C. Uchování vzorků pro měření je zobrazeno na obr. 4.1.



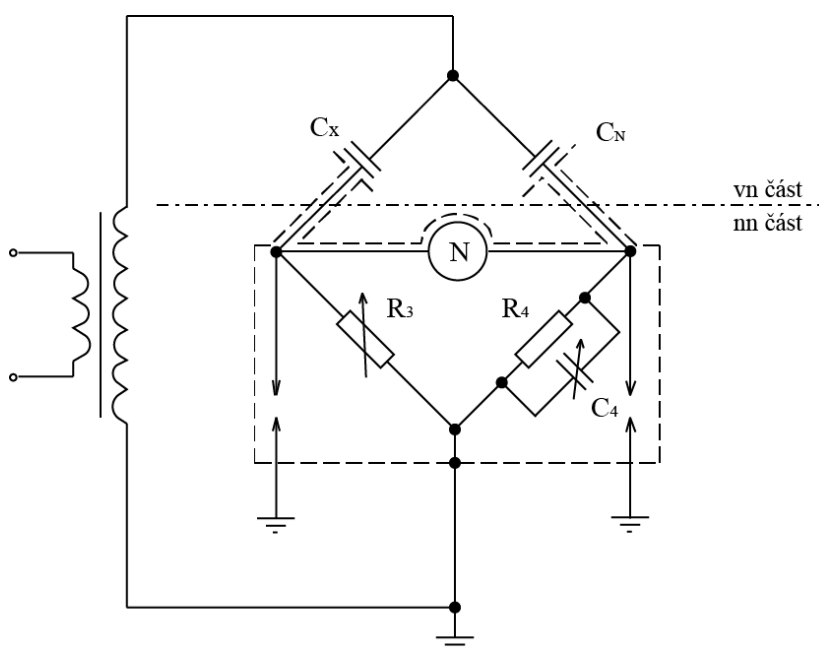
Obr. 4.1 Uskladnění zkoumaných olejů

## 4.1 Měřicí metody

Experiment tepelného zrychleného stárnutí se uskutečnil, z důvodu získání důležitých hodnot elektrických veličin, které dostatečným způsobem vykreslují aktuální stav měřeného oleje. Je to ztrátový činitel, vnitřní rezistivita, relativní permitivita a přeskokové napětí. Tyto parametry se získávaly ze dvou na sobě nezávislých měření.

#### 4.1.1 Měření ztrátového činitele

Jednou z nejpoužívanějších metod pro měření ztrátového činitele je pomocí Scheringova můstku. Je složen ze dvou hlavních částí. V první části jsou prvky umístěny ve vysokonapětovém prostoru zkušebny a druhá část se nachází mimo tento prostor a slouží k vyvažování. V uzlech diagnostické větve můstku jsou svodiče přepětí. Tyto svodiče slouží k ochraně obsluhy, pokud by došlo k průrazu vzorku. Nízkonapětová část je stíněna proti vlivům elektromagnetických parazitních polí, které ovlivňují přesnost měření. Použité zapojení Scheringova můstku je zobrazeno na obr. 4.2. [29]



Obr. 4.2 Scheringův můstek (překresleno z [29])

Měření pomocí Scheringova můstku bylo prováděno v předem daných časových intervalech. První měření proběhlo ihned po dodání. Následně se oleje proměřovaly v těchto časových intervalech 336 hodin, 576 hodin a 1056 hodin. Naměřené hodnoty ztrátového činitele se získávaly pro jednotlivé teplotní hodnoty s počátkem při 25 °C, s postupným krokem 10 °C až do 90°C, jelikož pro tuto teplotu jsou stanoveny normy. Pro účely toho měření byla frekvence 50 Hz a nastaveno napětí 500 V, hodnota  $C_0 = 60$  pF. Při každém získání požadované teploty byl můstek vyvážen a byly zapsány hodnoty ztrátového činitele, kapacity  $C_4$  a proudu, který se nechal ustálit po dobu jedné minuty. Z těchto hodnot se dále pro jednotlivé teploty vypočítala permitivita a vnitřní rezistivita dle vzorců 4.1, 4.2, 4.3, 4.4. Postupovalo se dle normy ČSN EN 60247.

$$C_x = \frac{100}{C_4} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (4.2)$$

$$R_v = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

$$\rho_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_0 \cdot R_v \quad (4.4)$$

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

$\varepsilon_0$  permitivita vakua  $8,85 \cdot 10^{-12}$

$C_0$  kapacita prázdné měřicí nádoby [F]

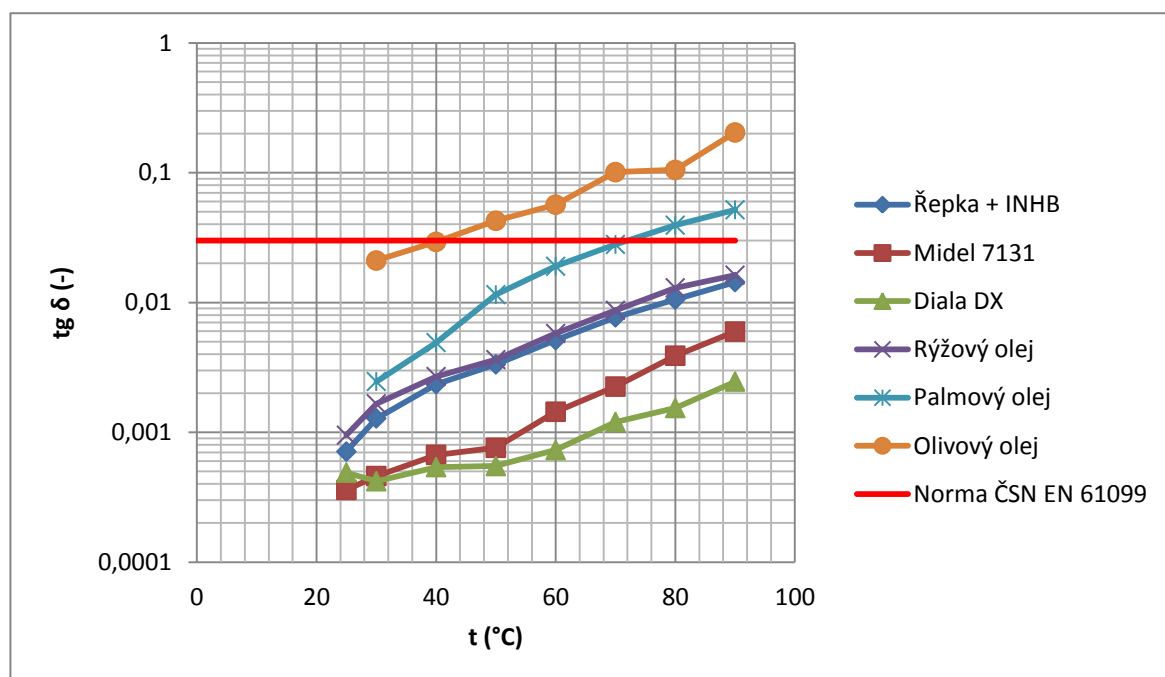
$R_v$  vnitřní elektrický odpor [ $\Omega$ ]

$\varepsilon_r$  relativní permitivita vakua [-]

$C_x$  kapacita plné měřicí nádoby [F]

$C_4$  vyrovnávací kapacita [F]

Při prvním měření olejů v dodaném stavu bylo zjištěno, že palmový a olivový olej nesplňují požadavky normy ČSN EN 61099, která říká, že ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  pro oleje na bázi syntetických esterů nesmí být při  $90^\circ\text{C}$  vyšší jak 0,03. Z toho důvodu se dále pokračovalo v rámci rostlinných olejů jen s rýžovým a řepkovým olejem. Výsledek měření olejů v dodaném stavu je znázorněn na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Hodnoty ztrátového v závislosti na teplotě pro dodaný stav olejů

### 4.1.2 Elektrodotový systém

Pro toto měření byl zvolen vhodný tříelektrodotový systém pro měření kapalin, který je zobrazen na obr 4.4. Jeho zapojení je dáno normou ČSN EN 60247. Čistota elektrodotového systému může ve velké míře ovlivnit výsledky naměřených hodnot, proto byla stanovena norma pro čištění elektrodotového systému při měření kapalin. Čištění elektrodotového systému probíhalo následovně. V první řadě se elektrodotový systém rozebral a omyl teplou vodou. Následně se elektrodotový systém omyl hexanem a vložil do ultrazvukové čističky, která byla nastavena na 40 °C po dobu 15 minut. Poté se součástky elektrodotového systému vyjmuly z ultrazvukové čističky a opět se omyly hexanem. Závěrem se všechny součástky elektrodotového systému přemístily do horkovzdušné pece na teplotu 110 °C, po dobu 1 hodiny, aby se důkladně vysušily.



Obr. 4.4 Elektrodotový systém pro měření kapalin

### 4.1.3 Měření přeskokového napětí

Hodnota přeskokového napětí je jednou z nejdůležitějších hodnot pro izolační kapalinu. Při měření se postupovalo podle normy ČSN EN 60156. Z naměřených hodnot přeskokového napětí se dále získávala hodnota elektrické pevnosti dle rovnice 4.5. Ta definuje velikost intenzity elektrického pole, které způsobuje přeskok mezi dvěma elektrodami.

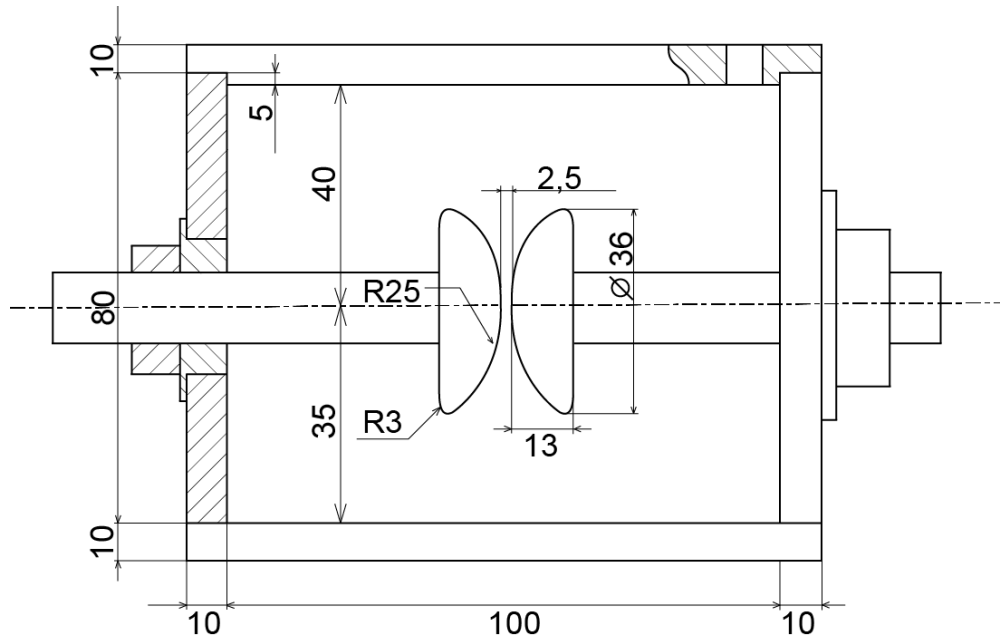
$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (4.5)$$

$E_p$  elektrická pevnost [ $V \cdot m^{-1}$ ]

$U_p$  přeskokové napětí [V]

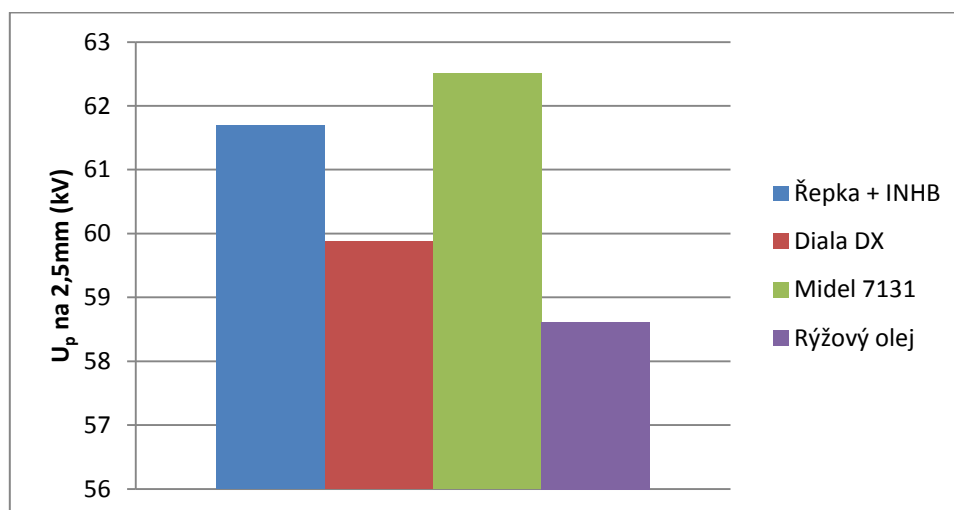
$d$  vzdálenost mezi elektrodami [m]

Při měření přeskokového napětí se používal elektroodový systém, jehož nákras je na obr. 4.4. Vzdálenost elektrod je dána normou na 2,5 mm. Každá izolační kapalina byla podrobena tomuto měření v dodaném stavu. Měření mělo 6 opakování. Mezi jednotlivými přeskoky byla dodržována prodleva 5 minut. Během tohoto času se ze zkoumaného oleje vymíchávaly vzduchové bubliny a nečistoty, které vznikly v důsledku přeskoku.



Obr. 4.5 Elektroodový systém pro měření přeskokového napětí kapalin (překresleno z [64])

Existuje více druhů norem pro požadované mezní hodnoty přeskokového napětí. Při vyhodnocení jsem použila normu ČSN EN 61099, která se zabývá nepoužitými syntetickými organickými estery, které jsou získány chemickým zpracováním a fyzikální úpravou mastných kyselin a polyalkoholů. V této konkrétní normě je minimální mezní hodnota přeskokového napětí stanovena na 45 kV. Jak je vidět na obr. 4.6 všechny vzorky olejů tuto normu splnily. Podrobné výsledky z měření přeskokového napětí u zkoumaných olejů v dodaném stavu jsou uvedeny v příloze této práce.



Obr. 4.6 Průměrné hodnoty přeskovového napětí u olejů v dodaném stavu

## 4.2 Výsledky měření

Výsledné hodnoty měření se z velké části vztahovaly na měření pomocí Scheringova můstku. Kdy se získaly hodnoty ztrátového činitele a relativní permitivity. Vnitřní rezistivita se měřila při stejnosměrném napětí, které mělo velikost 500 V, pomocí pikoampérmetru Keithlery. Následně vznikly dvě závislosti na těchto parametrech a to teplotní a časová, které jsou graficky znázorněny v dalších kapitolách. Kompletní podrobné výsledky měření zrychleného tepelného stárnutí jsou v příloze této práce.

### 4.2.1 Ztrátový činitel

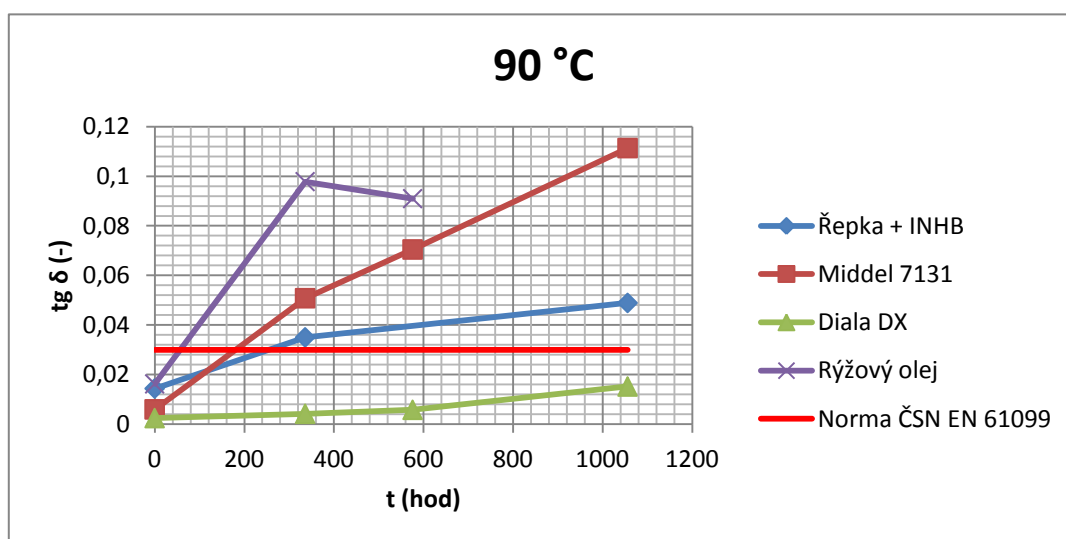
Pro hodnocení ztrátového činitele existuje hned několik norem. Ta nejpoužívanější je ČSN EN 60422, která se vztahuje na minerální oleje. Detailně je tato norma zobrazena v tab. 11. Dále lze hodnotu ztrátového činitele vyhodnocovat podle ČSN EN 61203 pro 1. skupinu esterů, kdy pro teplotu 20 °C je požadovaná hodnota  $\text{tg } \delta \leq 0,01$ . Pro tento experiment zrychleného tepelného stárnutí byla vybrána norma ČSN EN 61099 pro nepoužívané estery, která stanovuje hodnotu  $\text{tg } \delta$  pro teplotu 90 °C  $\leq 0.03$ . Stejnou limitní hodnotu stanovují i normy IEC 61620 a IEC 60247.

Tab. 11 Mezní hodnoty ztrátového činitele dle normy ČSN EN 60422

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



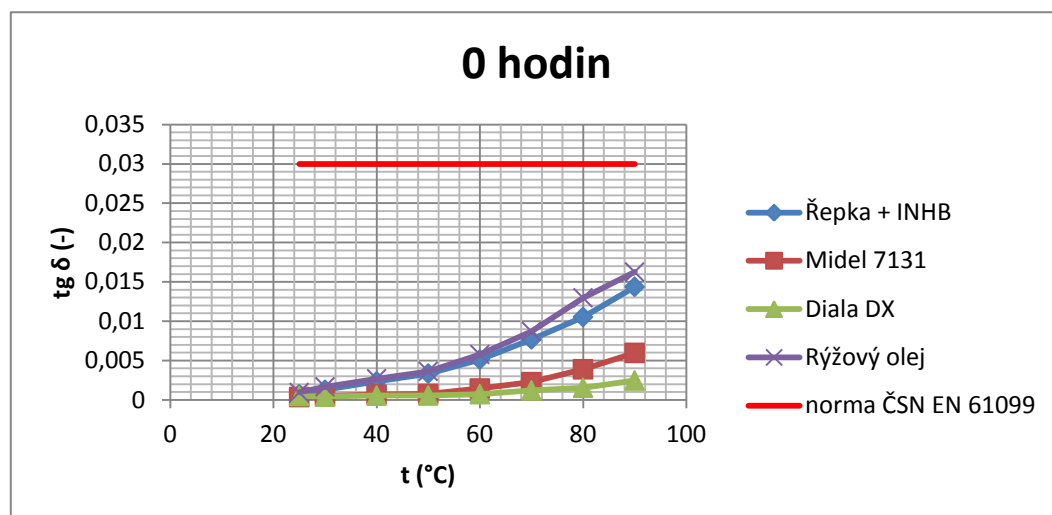
Závislost ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  na čase je zobrazena na obr. 4.7. Zde je patrné, že celý experiment zrychleného tepelného stárnutí zvládl podle normy ČSN EN 61099 nejlépe minerální olej DIALA DX. Zbylé oleje MIDEL 7131, řepkový olej s obsahem inhibitoru a rýžový olej se jeví na začátku pokusu jako perspektivní. Z naměřených hodnot lze vyzorovat, že rostlinné oleje stárnou rychleji než minerální olej DIALA DX. V důsledku této skutečnosti nevykazovaly hodnoty, které by respektovaly normu. MIDEL 7131, jako zástupce syntetických olejů na bázi organických esterů, při tepelném zrychleném stárnutí stárne rychleji než rostlinný řepkový olej s obsahem inhibitoru. Z tohoto pohledu lze řepkový olej s obsahem inhibitoru označit jako provozuschopný olej. Rýžový olej byl po 576 hodinách již razantně zestárlý. Hodnoty  $\text{tg } \delta$  rýžového oleje a dalších parametrů, které jsou uvedeny níže, nebyly konkurence schopné.



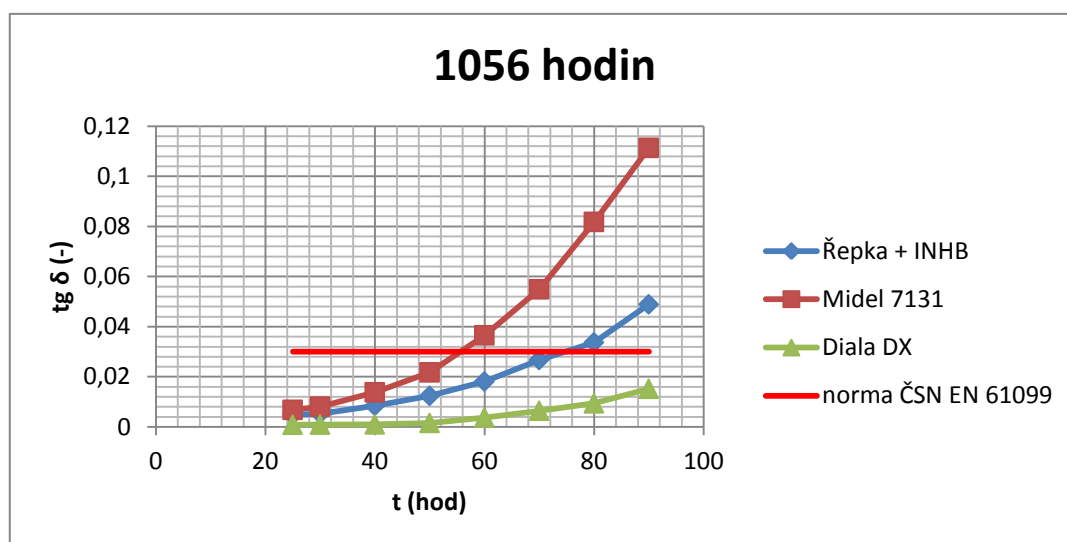
Obr. 4.7 Časová závislost ztrátového činitele při 90 °C

Výsledky teplotní závislosti ztrátového činitele jsou prezentovány na obr. 4.8 a 4.9. Zde jsou zobrazeny naměřené hodnoty na začátku experimentu a na jeho konci, přesněji po 1056 hodinách. Z grafu na počátku experimentu lze vysledovat, že všechny oleje, které byly podrobeny zrychlenému tepelnému stárnutí, vyhovují svými hodnotami ztrátového činitele normě ČSN EN 61099. Nejlepší hodnotu  $\text{tg } \delta$  měl minerální olej DIALA DX. Nejhorší  $\text{tg } \delta$  měl rýžový olej, který při zrychleném tepelném stárnutí příliš zestár a po 576 hodinách byl vyloučen. Z grafu 4.9, který zobrazuje výsledky po 1056 hodinách tepelného stárnutí, je patrné, že normě ČSN EN 61099 vyhovuje jen DIALA DX. MIDEL 7131 a řepkový olej s obsahem inhibitoru jsou po 1056 hodinách již do značné míry tepelně zestárle.

MIDEL 7131 dle naměřených hodnot tepelně stárne rychleji než řepkový oleje s obsahem inhibitoru. Z této skutečnosti lze tvrdit, že inhibice řepkového oleje byla úspěšná.



Obr. 4.8 Teplotní závislost ztrátového činitele při 0 hodinách tepelného stárnutí

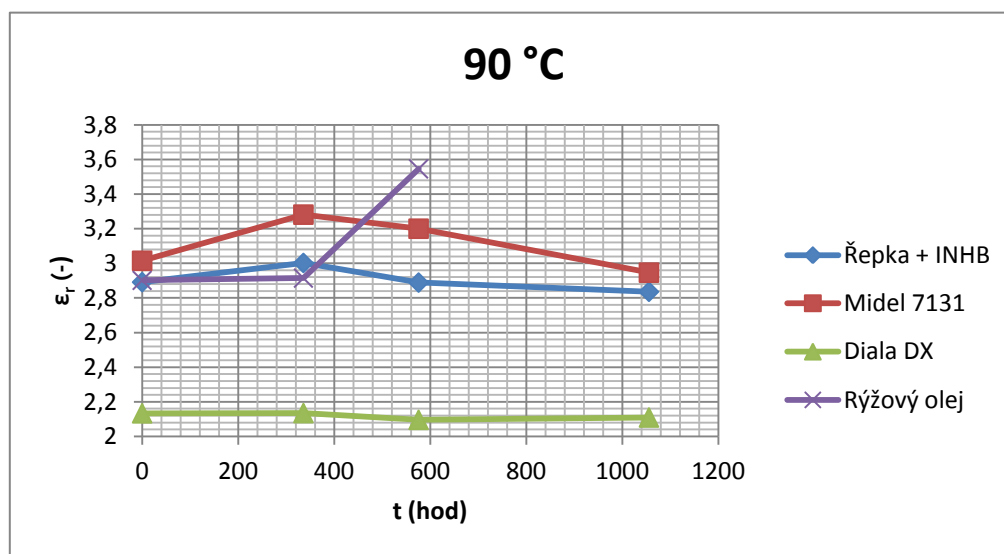


Obr. 4.9 Teplotní závislost ztrátového činitele při 1056 hodinách tepelného stárnutí

#### 4.2.2 Relativní permitivita

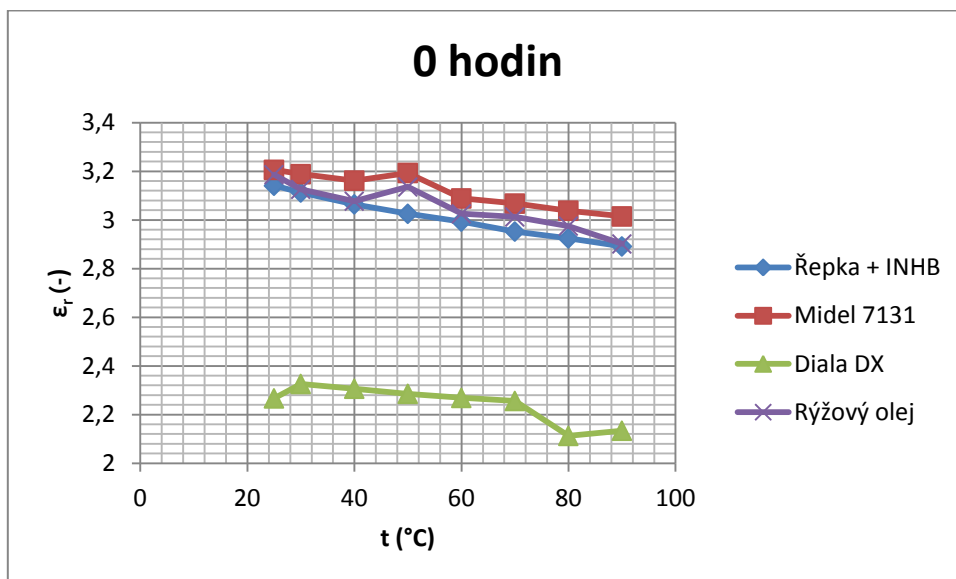
Pro relativní permitivitu neexistuje žádná norma, která by předepisovala požadovanou hodnotu. V kapitole 3.8 jsou uvedeny očekávané výsledky z praxe, které se pohybují mezi hodnotami 2 a 3. Na obr. 4.10 je znázorněna časová závislost vnitřní rezistivity při tepelném zrychleném stárnutí pro teplotu 90 °C. Očekávané hodnoty byly splněny. Naměřené hodnoty relativní permitivity referenčního oleje DIALA DX jsou nejmenší a konstantního charakteru. Nijak nevybočují od předpokladů. Komerčně používaný syntetický olej na bázi organických esterů MIDEL 7131 nabývá během zrychleného tepelného stárnutí zhoršení, které se

v závislosti na čase zlepšuje. Při konečném měření je hodnota relativní permitivity 2,9. Lze tedy tvrdit, že MIDEL 7131 také splnil očekávané výsledky. Rostlinný řepkový olej, který byl upraven přidáním inhibitoru, si vedl při zrychleném tepelném stárnutí lépe než již komerčně používaný MIDEL 7131. Tímto měřením se dokázalo, že hodnota relativní permitivity je pro řepkový olej splněna. Rýžový olej ve v počátcích experimentu zrychleného tepelného stárnutí jevil jako perspektivní olej, ovšem při měření po 576 hodinách byla hodnota relativní permitivity 3,55. Jelikož nesplnil ani normu pro  $\text{tg } \delta$ , viz výše, byl rýžový olej vyloučen z experimentu.

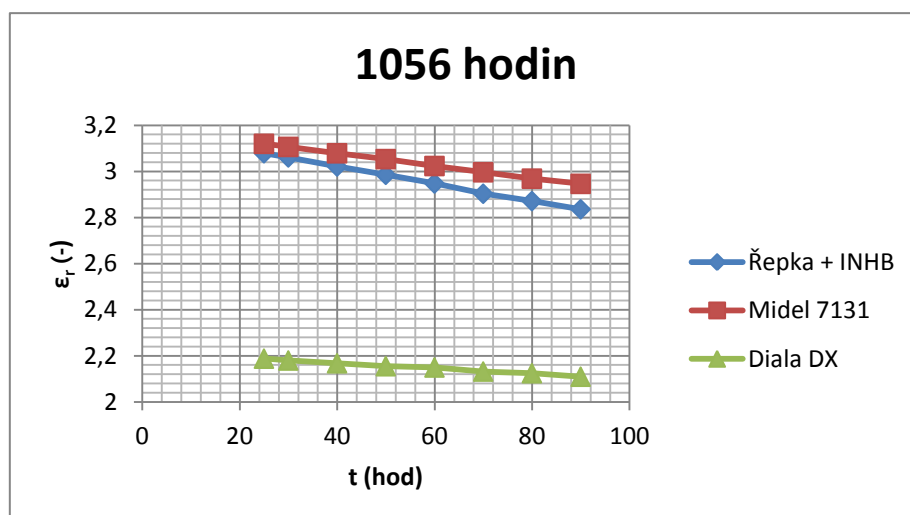


Obr. 4.10 Časová závislost relativní permitivity při 90 °C

Teplotní závislost relativní permitivity byla sledována v předem daných časových intervalech. Na obr. 4.11 je zobrazen výchozí stav všech olejů. Minerální olej DIALA DX má nejmenší hodnotu relativní permitivity, která se pohybuje od 2 až do 2,4. V teplotní závislosti se také potvrzují očekávané výsledky. Zbývající oleje MIDEL 7131, řepkový olej s obsahem inhibitoru a rýžový olej nabývají na začátku experimentu srovnatelných hodnot v závislosti na teplotě. Na obr 4.12 je zobrazena teplotní závislost relativní permitivity v konečné fázi experimentu zrychleného tepelného stárnutí po 1056 hodinách. Z tohoto grafu je vidět, že hodnoty relativní permitivity se od počátečního stavu výrazně nezměnily a jsou stále přijatelné.



Obr. 4.11 Teplotní závislost relativní permitivity při 0 hodinách tepelného stárnutí

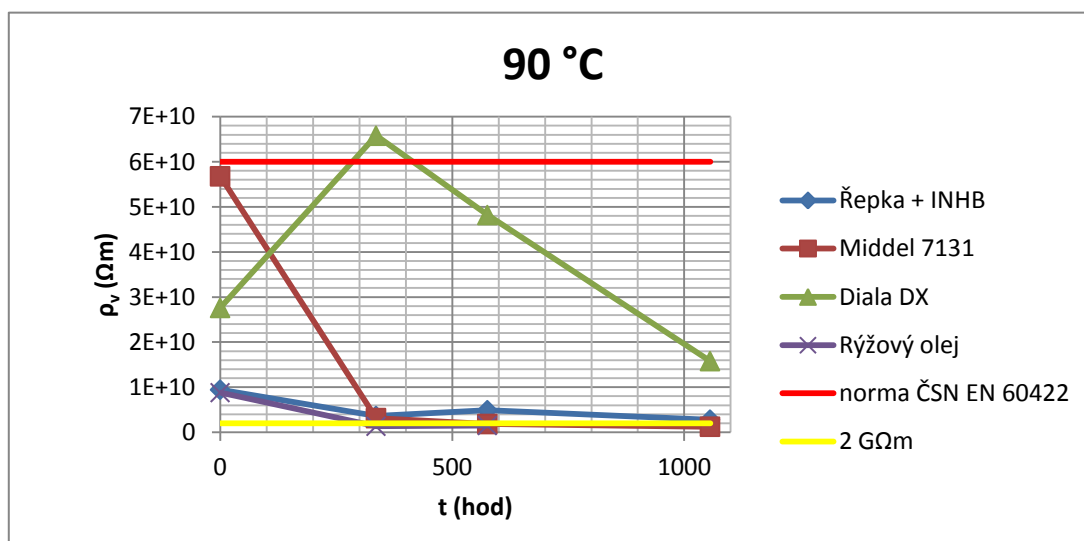


Obr. 4.12 Teplotní závislost relativní permitivity při 1056 hodinách tepelného stárnutí

### 4.2.3 Vnitřní rezistivita

Mezní hodnoty vnitřní rezistivity pro minerální oleje určuje norma ČSN EN 60422 následujícím způsobem. Pro transformátory s jmenovitým napětím  $\leq 170$  kV je minimální hodnota  $\rho_v$  60 G $\Omega$ m. Pro transformátory, které mají jmenovité napětí  $\geq 170$  kV je minimální hodnota  $\rho_v$  200 G $\Omega$ m. Tyto mezní hodnoty platí pro teplotu oleje 90 °C. Norma ČSN EN 61203 stanovuje další mezní  $\rho_v$  pro nepoužité estery, při teplotě 90 °C je  $\rho_v \geq 2$  G $\Omega$ m, pro syntetické oleje je stanovena mezní  $\rho_v \geq 6$  G $\Omega$ m při 20 °C. Pro perspektivní oleje při 20 °C by měla být vnitřní rezistivita  $> 60$  G $\Omega$ m.

Z grafu 4.13 časové závislosti vnitřní rezistivity při 90 °C je možné tvrdit, že všechny zkoumané oleje splňují normu pro nepoužité estery, která požaduje  $\rho_v \geq 2 \text{ G}\Omega\text{m}$  pro 90 °C. V experimentu zrychleného tepelného stárnutí normu pro minerální oleje ČSN EN 60422 splňuje jen částečně minerální olej DIALA DX. Nejpravděpodobněji byla tato skutečnost zapříčiněna razantním zestárnutím zbývajících olejů. Z tohoto důvodu je nutné složení rostlinných olejů i syntetických olejů na bázi organických esterů upravit takovým způsobem, aby se jejich výsledné elektrické vlastnosti co nejvíce přibližovaly k již osvědčeným minerálním olejům.

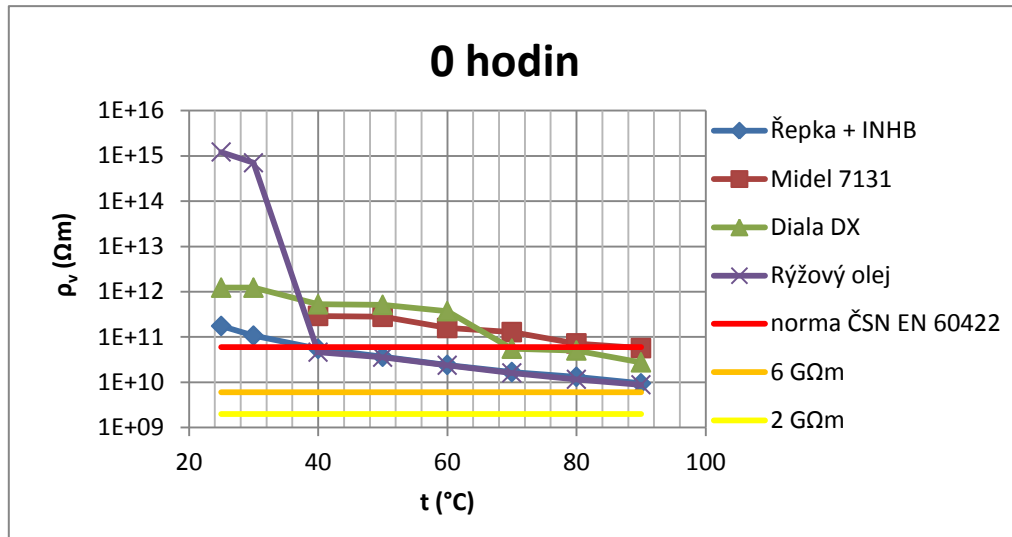


Obr. 4.13 Časová závislost vnitřní rezistivity při 90 °C

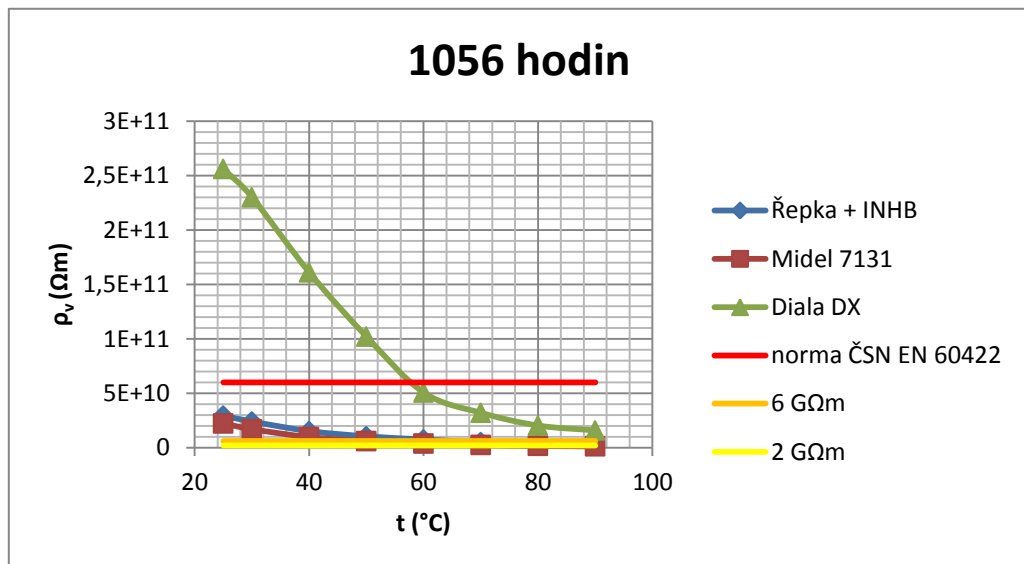
Teplotní závislost vnitřní rezistivity na počátku experimentu je zobrazena na obr. 4.14, ze kterého je patrné, že všechny zkoumané oleje splňují normu ČSN EN 61203 pro nepoužité estery, syntetické oleje, i perspektivní kapaliny. Ovšem normu ČSN EN 60422 pro teplotu 90 °C, která požaduje  $\rho_v > 60 \text{ G}\Omega\text{m}$ , nesplňuje žádný zkoumaný olej, i když se jedná o dodaný stav. Nejlepší hodnotu vnitřní rezistivity pro nízké teploty vykazoval rýžový olej. Se zvyšující se teplotou  $\rho_v$  rýžového oleje rapidně klesla a pro teplotu 90 °C je  $\rho_v$  rýžového oleje nejhorší naměřenou hodnotou. Proto lze tvrdit, že rýžový olej má dobré elektroizolační vlastnosti při nízkých provozních teplotách. S postupným zvyšováním provozní teploty se jeho elektroizolační vlastnosti zhoršují.

Na grafu 4.15 jsou zobrazeny výsledky vnitřní rezistivity na konci experimentu zrychleného tepelného stárnutí. Řepkový olej s obsahem inhibitoru a MIDEL 7131 nesplňují normu ČSN EN 60422 pro minerální oleje a jen částečně splňují normu ČSN EN 61203 pro

nepoužité estery. Jsem toho názoru, že mezní hodnoty vnitřní rezistivity pro perspektivní oleje nejsou správně nastaveny k povaze a vlastnostem těchto nových izolačních kapalin. Minerální olej DIALA DX, byl již zestárlý do takové míry, že příslušnou normu ČSN EN 60422 pro 90 °C při experimentu zrychleného tepelného stárnutí nesplňuje. Z této skutečnosti lze usoudit, že všechny oleje, které byly zařazeny do experimentu zrychleného tepelného stárnutí, byly dostatečným způsobem zestárlé a je možné prokázat vlastnosti těchto olejů.



Obr. 4.14 Teplotní závislost vnitřní rezistivity při 0 hodinách tepelného stárnutí



Obr. 4.15 Teplotní závislost vnitřní rezistivity při 1056 hodinách tepelného stárnutí

## Závěr

Mezi cíle mé práce na téma „Diagnostika stavu elektroizolačních struktur“, patřilo přehledně interpretovat informace o elektroizolačních systémech, které se v současné době používají ve VN technice dle jejich skupenství. Větší důraz byl kladen na popsání materiálů, které jsou použity při realizaci elektroizolačního systému transformátoru, konkrétně oleje a papíru.

Dále bylo mým úkolem popsat degradační mechanismy, které probíhají ve výkonovém transformátoru během jeho provozu. Souhrnně specifikovat důležité diagnostické parametry pro elektroizolační systém olej-papír s určením způsobu měření a vyhodnocením získaných výsledků. Tyto diagnostické parametry se vyhodnocují pomocí norem pro izolační kapaliny, které jsou z převážné části nastaveny na vlastnosti minerálních olejů. Zatímco nové perspektivní oleje mají odlišné složení oproti používaným minerálním olejům. Mezi perspektivní oleje se řadí oleje na bázi přírodních nebo syntetických organických esterů a rostlinné oleje. Tyto oleje vykazují odlišné vlastnosti, ale i jinou rychlost degradace. Jsem toho názoru, že perspektivní oleje zatím nejsou dostatečně prozkoumanou oblastí, aby bylo možno vytvořit adekvátní normy pro tyto izolační kapaliny. Jejich plnou funkčnost ověří až reálné zatížení v transformátoru.

Součástí mé práce byla realizace experimentu zrychleného tepelného stárnutí, které probíhalo v laboratořích KET. K dispozici byly vzorky různých druhů olejů pro transformátory, které jsou popsány výše. Můj osobní přínos k tomuto experimentu byla iniciativa k přidání dalších vzorků rostlinných olejů, které jsou komerčně používané pro jiné účely než elektroizolační. Jednalo se o palmový olej, olivový olej a rýžový olej, které nebyly žádným způsobem upraveny pro elektroizolační účely. Od katedry technologií a měření mi byly poskytnuty další vzorky minerálního, syntetického a rostlinného oleje.

Experiment zrychleného tepelného stárnutí byl zaměřen na měření elektrických parametrů alternativních izolačních kapalin, jako je ztrátový činitel, vnitřní rezistivita, relativní permitivita, průrazné napětí a elektrická pevnost. Důvodem byla skutečnost, že se jedná o důležité diagnostické parametry, které rozhodují o použitelnosti izolační kapaliny.

Na základě naměřených hodnot teplotní závislosti ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  v dodaném stavu bylo rozhodnuto, že se již dále nebude pokračovat v experimentu zrychleného tepelného stárnutí s olivovým a palmovým olejem. Ztrátový činitel u těchto olejů nespĺňoval normu ČSN EN 61099 pro syntetické oleje na bázi přírodních esterů pro teplotu 90 °C. Při vyhodnocování ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  na konci experimentu zrychleného tepelného

stárnutí jsem se řídila stejnou normou. Nejnižší křivku  $\text{tg } \delta$  měl minerální olej DIALA DX. Tato skutečnost se očekávala i na začátku experimentu, jelikož byl tento olej určen jako referenční. Díky úpravě řepkového oleje, do kterého se přidaly inhibitory, bylo možné dosáhnout lepších hodnot ztrátového činitele. To mělo za následek, že řepkový olej s obsahem inhibitoru vykazoval lepší hodnoty  $\text{tg } \delta$  než syntetický olej na bázi organických esterů MIDEL 7131. Rýžový olej byl po uplynutí 576 hodin tepelného stárnutí z experimentu vyřazen pro jeho velkou tepelnou degradaci.

Z dopočítaných hodnot relativní permitivity byly vytvořeny časové a teplotní závislosti, které poukazují na vysokou hodnotu  $\epsilon_r$  syntetického oleje na bázi organických esterů MIDEL 7131. Vyšší  $\epsilon_r$  byla dopočítána již jen pro rýžový olej po 576 hodinách, kdy byl tento olej velmi teplotně degradován. Pro relativní permitivitu neexistuje žádná norma. Z tohoto důvodu nelze prohlásit, za testované oleje splnily požadované hodnoty. Poznatky z praxe jsou takové, že relativní permitivita se pohybuje v rozmezí 2 a 3, což se v experimentu potvrdilo. Pro vnitřní rezistivitu existuje norma ČSN EN 60422 s limitními hodnotami  $\rho_v$ , které by pro 90 °C neměly být menší než 60 GΩm. Tuto normu nesplnil v dodaném stavu ani jeden z měřených olejů. Při následném experimentu zrychleného tepelného stárnutí bylo z hodnot vnitřní rezistivity dokázáno, že stárnutí bylo dostatečné na prokázání vlastností olejů.

Z měření průrazného napětí je zjištěno, že DIALA DX, MIDEL 7131, řepkový olej s obsahem inhibitoru a rýžový olej splňují normu ČSN EN 61099 pro nepoužité syntetické organické estery, která stanovuje minimální hodnotu  $U_p$  na 45 kV. Palmový a olivový olej nesplňují ani tento diagnostický parametr, čímž se potvrdily závěry z měření ztrátového činitele. Tyto oleje jsou pro elektroizolační účely nevyhovující.

Z realizovaného experimentu zrychleného tepelného stárnutí je patrné, že výzkum nových alternativních izolačních kapalin pro výkonové transformátory má smysl. Jelikož tímto experimentem bylo potvrzeno, že syntetické oleje na bázi organických esterů splňují normy pro průrazné napětí i ztrátový činitel. Řepkový olej s obsahem inhibitoru se vyrovná svými elektrickými vlastnostmi s již zmiňovaným syntetickým olejem na bázi organických esterů MIDEL 7131. Proto může být inhibice řepkového oleje označena jako úspěšná. Z tohoto důvodu je třeba ve výzkumu pokračovat a zaměřit se i na neelektrické vlastnosti perspektivních olejů. Závěrem lze říci, že následující vývoj může vést k úplnému nahrazení minerálních olejů, které jsou neobnovitelným zdrojem. To se může stát jen za předpokladu, že perspektivní oleje budou dostatečně stabilní a splní všechny požadované normy pro izolační kapaliny.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002
- [2] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha : BEN - technická literatura, 2006
- [3] Matějčíček, Lukáš. Technologie Eaton používané v oblasti vysokého napětí. *Elektro*. 2011, č. 7, s. 2. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44228.pdf>
- [4] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír* [online]. 2007 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>
- [5] HEATHCOTE, M. J. *J&P Transformer book*. Oxford : Elsevier, 2008. ISBN 978-0-7506-8164-3.
- [6] HASSDENTEUFEL, Josef, et al. Elektrotechnické materiály. 2. Vydání. Bratislava : Alfa, 1978. 607 s. ISBN 63-555-78.
- [7] KUBALÍK a STEJSKAL. *Perspektivy v oblasti kapalných izolantů* [online]. 2007 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/105.pdf>
- [8] ŠIRŮČEK, Martin. *Zlepšování parametrů výkonových transformátorů* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/z749i3/>. Disertační práce. Západočeská univerzita Plzeň.
- [9] STOCKTON, D.P., et al. Natural ester Transformer fluids: Safety, reliability and environmental performance. In: *PCIC '07*. 2007
- [10] *Transformers transformed* [online]. 2013 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/f751e808b141641ec1257b02002933a8/\\$file/1LAB000500\\_ABB%20Review%202-2012\\_48-54\\_Transformers%20transformed\\_EN\\_72dpi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/f751e808b141641ec1257b02002933a8/$file/1LAB000500_ABB%20Review%202-2012_48-54_Transformers%20transformed_EN_72dpi.pdf)
- [11] MENTLÍK, Václav, Pavel TRNKA, Josef PIHERA a Roman HAMAR. Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky. *ELEKTRO* [online]. 2008, č. 12 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38198](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38198)
- [12] G. Stone, *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair.*, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2004
- [13] HELGESON, Anders a Uno GAFVERT. Dielectric Response During Curing of a Resin-Rich Insulation System for Rotating Machines. [online]. 1999 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://80.ieeexplore.ieee.org.dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=651263>
- [14] Vacuum Pressure Impregnation (VPI) Systems. [online]. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://www.wsf-industries.com/VPI.htm>
- [15] MIKOVCOVÁ, P. Porovnání technologie Resin Rich a VPI pro izolační systémy. In: *Elektrotechnika a informatika 2005. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. s. 53-56. ISBN: 80-7043-375-2
- [16] POLJAK, F. *Štruktúra a vlastnosti materiálov II*. Edičné stredisko SVŠT Bratislava, 1986.
- [17] MIDEL 7131 - nehořlavá, biologicky odbouratelná izolační kapalina. *Elpro-Energo* [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/olej/>
- [18] OLEJ, Vladimír; PETR, Pavel. *Expertní systémy*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1997. ISBN 80-7194-095-X.
- [19] Kaučuk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kau%C4%8Duk>
- [20] Steatit s.r.o. [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://www.steatit.cz/fotogalerie>

- [21] ŠIMKOVÁ, Martina. *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno, 2010. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [22] SCHEJBAL, Václav. *Diagnostika transformátoru prostřednictvím analýzy elektroizolační kapaliny*. Plzeň, 2007. Disertační. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [23] LI, Xiaohu, Jian LI a Caixin SUN. Properties of Transgenic Rapeseed Oil based Dielectric Liquid. *Proceedings of the IEEE SoutheastCon*. 2006
- [24] PREVOST, T.A. a T.V. OOMMEN. Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I - history and development. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006, roč. 22, č. 1
- [25] Katalogový list Biotemp [online]. 2005 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z WWW: <<http://www05.abb.com>>.
- [26] Katalogový list MIDEL 7131 [online]. 2010 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.MIDEL.com>>.
- [27] STOCKTON, D.P., et al. Natural ester Transformer fluids: Safety, reliability and environmental performance. In: *PCIC '07*. 2007
- [28] TENBOHLEN, S., VAHIDI, F., GEBAUER, J., KRUGER M., MULLER, P. Assessment of Power Transformer Reliability. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany, 2011
- [29] MENTLÍK, Václav et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [30] TRNKA, Pavel. *Transformátory: TLP 7P* [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: [https://courseware.zcu.cz/wps/PA\\_Courseware/DownloadDokumentu?id=90241](https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=90241)
- [31] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1: úvod-transformátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980
- [32] ČSN IEC 60076-7 (351001). Výkonové transformátory: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů. Česky normalizační institut: Praha, 2007.
- [33] TRNKA, Pavel. *Transformátory* [online]. 2014 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: [https://courseware.zcu.cz/wps/PA\\_Courseware/DownloadDokumentu?id=102278](https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=102278)
- [34] ČSN IEC 60076-2 (351001). Výkonové transformátory: Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny. Česky normalizační institut: Praha, prosinec 2011.
- [35] TRNKA, Pavel. Zbytková životnost elektroizolačních systémů. *Zbytková životnost elektroizolačních systémů* [online]. 2009, č. 22, s. 7 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000307-d1de4d2d85>
- [36] TRNKA, Pavel. *Životnost elektroizolačních systémů - modely stárnutí* [online]. 2013 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: [https://courseware.zcu.cz/wps/PA\\_Courseware/DownloadDokumentu?id=88548](https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=88548)
- [37] JIRÁK, J., Autratura, R. Liedermann, K., a spol. *Materiály a technická dokumentace: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně*, Brno 2002.
- [38] *Vlastnosti papíru a jeho degradace – teoretická část* [online]. 2011 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res\\_vlastnosti\\_papiru/index.htm](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_vlastnosti_papiru/index.htm)
- [39] ŠIRŮČEK, M. a P. TRNKA. Detekce tepelné expozice izolačního systému olej-papír s oleji na bázi přírodních esterů. *Electroscope* [online]. 2013, č. 2 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5905/r7c1c5.pdf?sequence=1>
- [40] UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ [online]. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.uncp.edu.pe/newfacultades/ingenieriasarqui/newelectrica/phocadownload/descargas/E%20BOOK%20Electric%20Power%20Transformer%20Engineering.pdf>
- [41] ĎUROIČ M. a kol.: *Restaurování a konzervování archiválií a knih*. PASEKA. 2002.
- [42] PROSR, Pavel. *On-line diagnostický systém výkonových transformátorů*. Plzeň, 2005. Disertační práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.

- [43] SPARLING, Brian a Jacques AUBIN. Assessing Water Content in Insulating Paper of Power Transformers. 2010, [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: [http://ewh.ieee.org/soc/pes/saintlouis/2010%2012%206/Moisture-in-Insulation\\_Paper.pdf](http://ewh.ieee.org/soc/pes/saintlouis/2010%2012%206/Moisture-in-Insulation_Paper.pdf)
- [44] *Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems* [online]. 1999 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <https://www.ee.washington.edu/research/seal/pubfiles/00744585.pdf>
- [45] *Elektrotechnologie* [online]. 2005 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: [http://5ep.wz.cz/data/ucebnice\\_elt.pdf](http://5ep.wz.cz/data/ucebnice_elt.pdf)
- [46] *Polymery II* [online]. 2010 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: [http://www.procesniinzenyrstvi.wz.cz/2\\_rocnik/polymery\\_II/zpracovane\\_prednasky\\_1-11.pdf](http://www.procesniinzenyrstvi.wz.cz/2_rocnik/polymery_II/zpracovane_prednasky_1-11.pdf)
- [47] *2. Kaučuky* [online]. 2010 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: [www.utb.cz/file/36214\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/36214_1_1/)
- [48] KRALJ, Lenart a Damijan MILJAVEC. Stray losses in power transformer tank walls and construction parts. [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: [http://www.cedrat.com/fileadmin/user\\_upload/cedrat\\_groupe/Publications/Publications/2010/09/2010\\_Stray\\_losses\\_in\\_power\\_transformer\\_tank\\_walls\\_and\\_construction\\_parts\\_Miljavec\\_Kralj\\_Univ\\_Ljubljana\\_ICEM.pdf](http://www.cedrat.com/fileadmin/user_upload/cedrat_groupe/Publications/Publications/2010/09/2010_Stray_losses_in_power_transformer_tank_walls_and_construction_parts_Miljavec_Kralj_Univ_Ljubljana_ICEM.pdf)
- [49] TENBOHLEN, S. a M. KOCH. Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010, č. 2.
- [50] Ing. Kocman V., *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů* SNTL Praha, 1974
- [51] RŮŽIČKOVÁ, V. Aspekty on-line diagnostiky transformátorů. In: Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice [online]. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>
- [52] ŠIMKOVÁ, Martina. Příspěvek k diagnostice výkonových transformátorů olejových. Brno, 2010. Doktorská práce. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
- [53] DONČUK, J. a P. MRÁZ. Možnosti stanovení vlhkosti v pevné izolaci transformátoru. *Electroscope* [online]. 2012, č. 2 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: [http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo2\\_2012/r6c1c4.pdf](http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo2_2012/r6c1c4.pdf)
- [54] ABU-SIADA, A., S. M. ISLAM, and G. LENCO. "Correlation between Uv-Vis Spectral Response and Furan Measurement of Transformer Oil." International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008.
- [55] HÖHLEIN, I., and A. J. KACHLER. "Aging of Cellulose at Transformer Service Temperatures. Part 2. Influence of Moisture and Temperature On Degree of Polymerization and Formation of Furanic Compounds in Free-Breathing Systems." *IEEE Electrical Insulation Magazine* 21, no. 5
- [56] GRAY, I.A.R. *Evaluation of Transformer Solid Insulation* [online]. 2006 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: [http://www.satcs.co.za/Evaluation\\_of\\_Transformer\\_Solid\\_Insulation\\_rev2.pdf](http://www.satcs.co.za/Evaluation_of_Transformer_Solid_Insulation_rev2.pdf)
- [57] HAMMER, Miloš, Jakub ERTL, Oldřich BARVENČÍK a David KUTÁLEK. Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů - 2. část. *Elektrorevue* [online]. 2011, č. 53 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/35/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast/>
- [58] DVOŘÁK, Lukáš. *Vlastnosti tekutin* [online]. 2010 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>
- [59] ČSN EN 62021-1. *Izolační kapaliny - Stanovení čísla kyselosti*. 2004.
- [60] ČERNÝ, Jaroslav a Nadia LADYKA. *Oxidační stárnutí a degradace izolačních olejů* [online]. 2013 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no\\_cache=1&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=5114&cHash=c8f9544278&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=5114&cHash=c8f9544278&type=98)

- [61] ALUYOR, Emmanuel O. a Mudiakeoghene ORI-JESU. *Biodegradation of mineral oils – A review* [online]. 2009 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.ajol.info/index.php/ajb/article/viewFile/59986/48255>
- [62] VÖLTZ, Martin. *New Test Method for Lubricant Biodegradability* [online]. 2014 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29700/lubricant-biodegradability-test>
- [63] *OECD GUIDELINE FOR TESTING OF CHEMICALS: Ready Biodegradability* [online]. 1992 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948209.pdf>
- [64] ČSN EN 60156 (346716). *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační insitut, 1998.

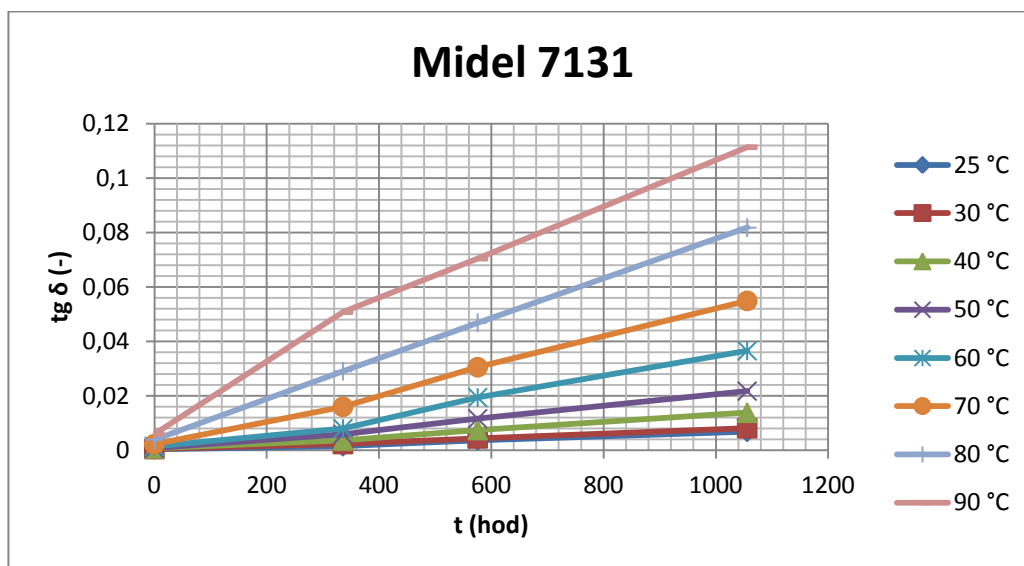
## Příloha

### Naměřené hodnoty ztrátového činitele

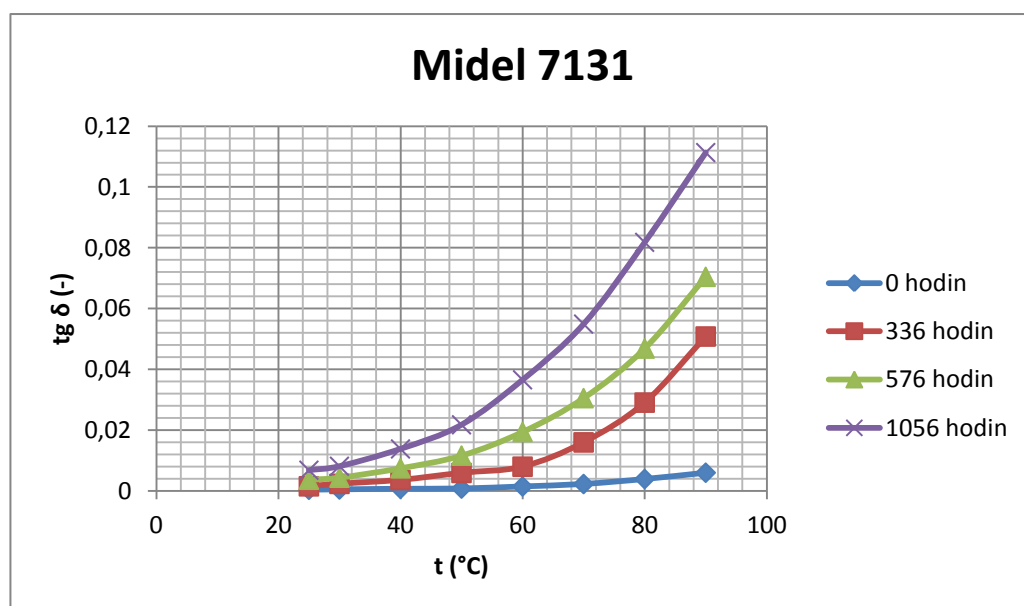
#### Syntetický olej

Tab. 1. Naměřené hodnoty ztrátového činitele pro olej MIDEL 7131

| MIDEL 7131 | 0 hodin | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|------------|---------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C      | 0,00036 | 0,0015    | 0,003675  | 0,0068     |
| 30 °C      | 0,00046 | 0,0023    | 0,00435   | 0,0081     |
| 40 °C      | 0,00067 | 0,00358   | 0,00743   | 0,0138     |
| 50 °C      | 0,00076 | 0,0059    | 0,0116    | 0,02175    |
| 60 °C      | 0,00144 | 0,00795   | 0,01938   | 0,03655    |
| 70 °C      | 0,00225 | 0,01595   | 0,03052   | 0,0549     |
| 80 °C      | 0,00389 | 0,02905   | 0,04685   | 0,0818     |
| 90 °C      | 0,00597 | 0,0508    | 0,07045   | 0,11135    |



Obr. 1 Časová závislost ztrátového činitele pro olej MIDEL 7131

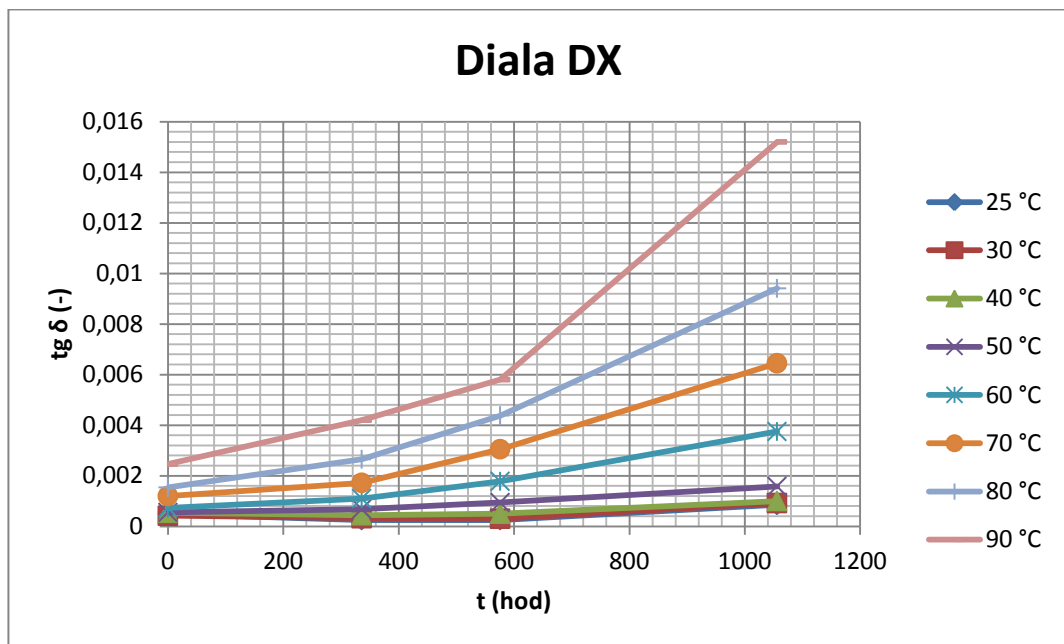


Obr. 2 Teplotní závislost ztrátového činitele pro olej MIDEL 7131

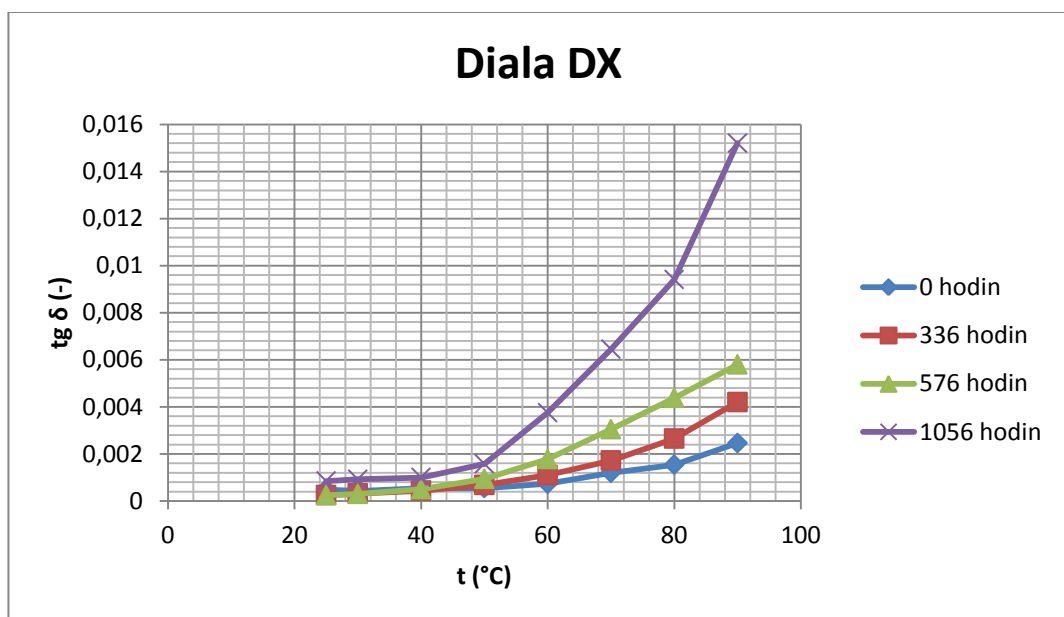
**Minerální olej**

**Tab. 2. Naměřené hodnoty ztrátového činitele pro olej DIALA DX**

| DIALA DX | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|----------|----------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C    | 0,00049  | 0,00025   | 0,00025   | 0,00085    |
| 30 °C    | 0,00042  | 0,00032   | 0,0003    | 0,00092    |
| 40 °C    | 5,40E-04 | 0,00044   | 0,0005    | 0,001      |
| 50 °C    | 5,50E-04 | 0,00068   | 0,00094   | 0,00158    |
| 60 °C    | 7,30E-04 | 0,0011    | 0,00178   | 0,00375    |
| 70 °C    | 1,20E-03 | 0,00172   | 0,00305   | 0,00645    |
| 80 °C    | 1,54E-03 | 0,00265   | 0,00438   | 0,00941    |
| 90 °C    | 2,46E-03 | 0,0042    | 0,0058    | 0,0152     |



**Obr. 3 Časová závislost ztrátového činitele pro olej DIALA DX**

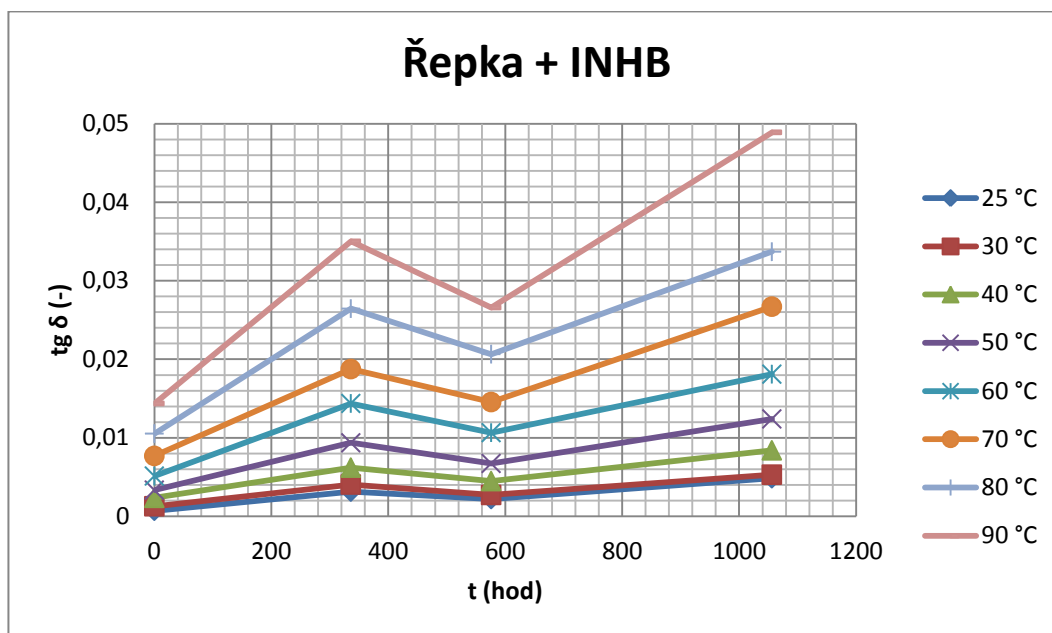


**Obr. 4 Teplotní závislost ztrátového činitele pro olej DIALA DX**

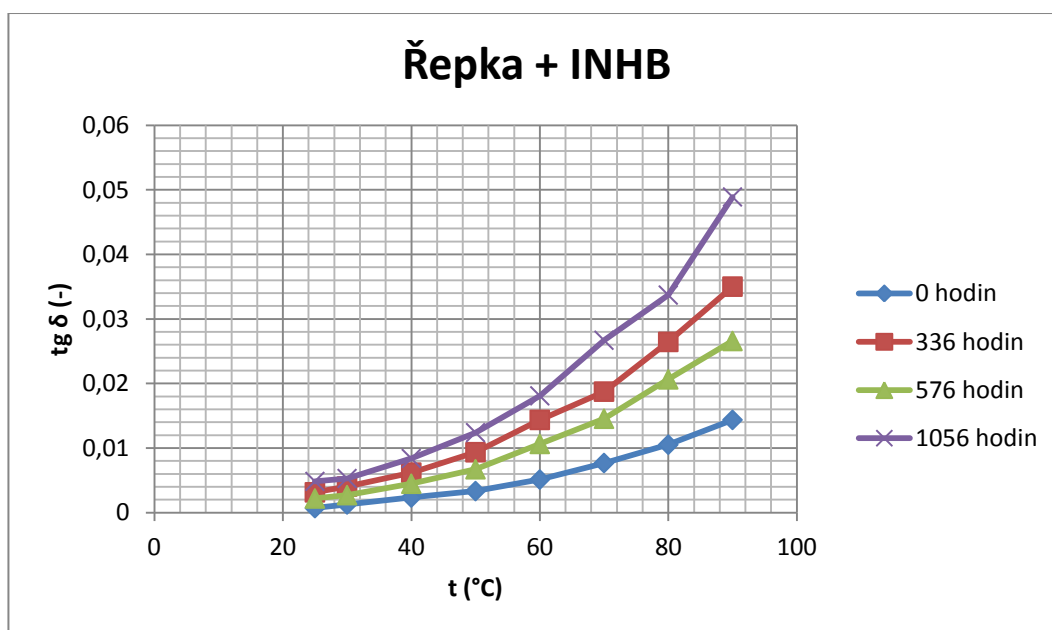
## Rostlinné oleje

Tab. 3. Naměřené hodnoty ztrátového činitele pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

| Řepka + INHB | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C        | 0,00049  | 0,00025   | 0,00025   | 0,00085    |
| 30 °C        | 0,00042  | 0,00032   | 0,0003    | 0,00092    |
| 40 °C        | 5,40E-04 | 0,00044   | 0,0005    | 0,001      |
| 50 °C        | 5,50E-04 | 0,00068   | 0,00094   | 0,00158    |
| 60 °C        | 7,30E-04 | 0,0011    | 0,00178   | 0,00375    |
| 70 °C        | 1,20E-03 | 0,00172   | 0,00305   | 0,00645    |
| 80 °C        | 1,54E-03 | 0,00265   | 0,00438   | 0,00941    |
| 90 °C        | 2,46E-03 | 0,0042    | 0,0058    | 0,0152     |



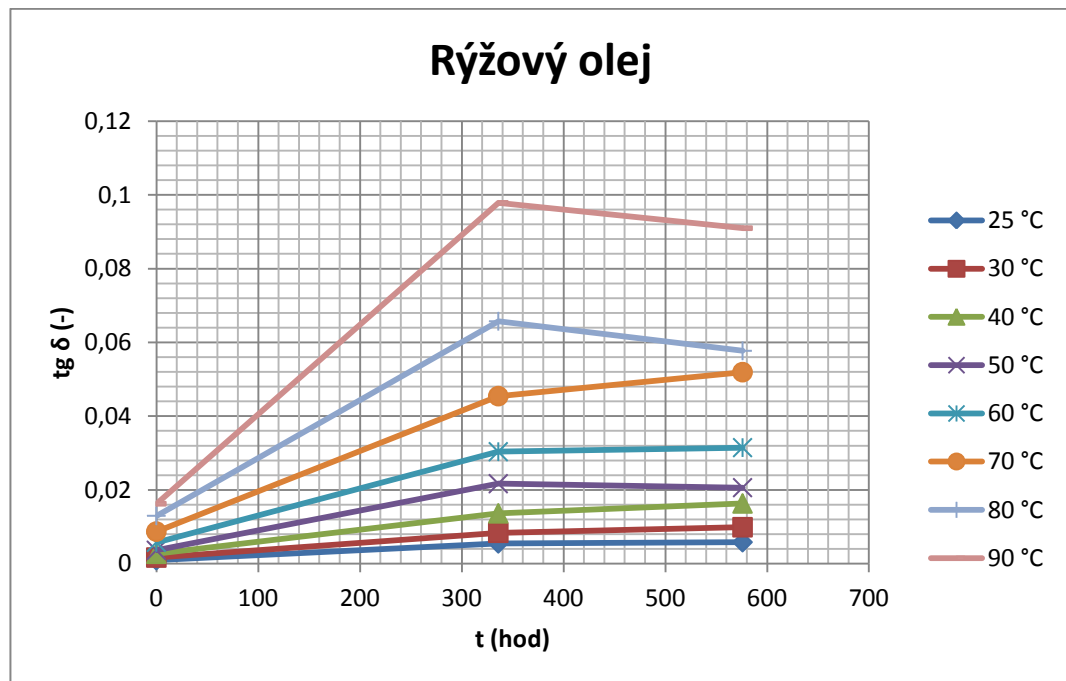
Obr. 5 Časová závislost ztrátového činitele pro řepkový olej s obsahem inhibitoru



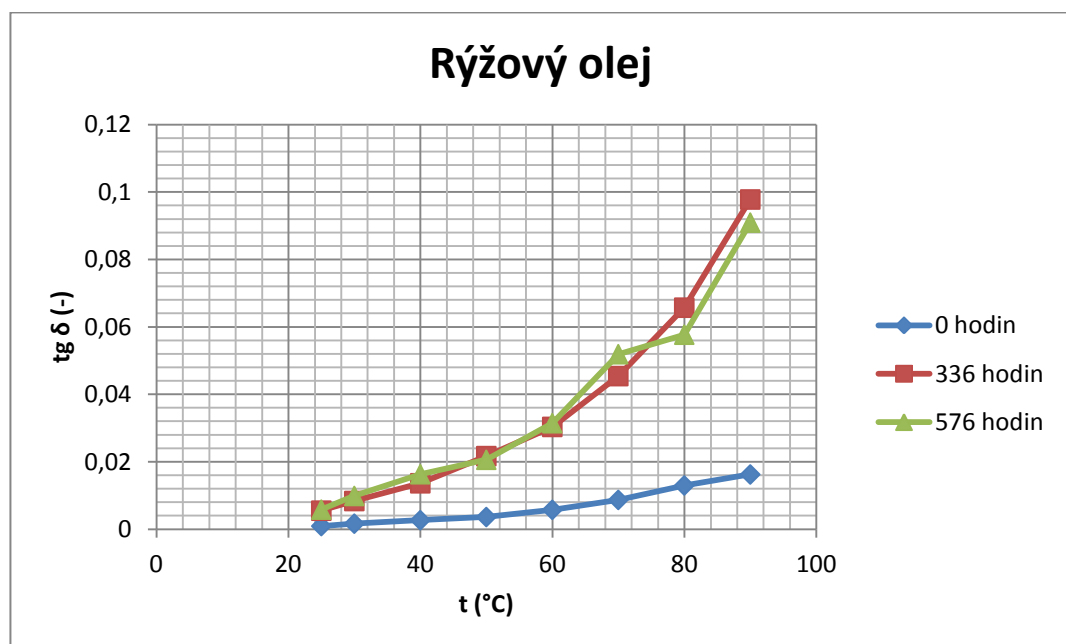
Obr. 6 Teplotní závislost ztrátového činitele pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

Tab. 4. Naměřené hodnoty ztrátového činitele pro rýžový olej

| Rýžový olej | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| 25 °C       | 0,00095  | 0,00551   | 0,00583   |
| 30 °C       | 0,00166  | 8,38E-03  | 9,88E-03  |
| 40 °C       | 2,69E-03 | 1,37E-02  | 1,63E-02  |
| 50 °C       | 3,63E-03 | 2,17E-02  | 2,06E-02  |
| 60 °C       | 5,77E-03 | 3,04E-02  | 3,15E-02  |
| 70 °C       | 8,70E-03 | 4,54E-02  | 5,19E-02  |
| 80 °C       | 1,30E-02 | 6,57E-02  | 5,77E-02  |
| 90 °C       | 1,63E-02 | 9,78E-02  | 9,10E-02  |



Obr. 7 Časová závislost ztrátového činitele pro rýžový olej

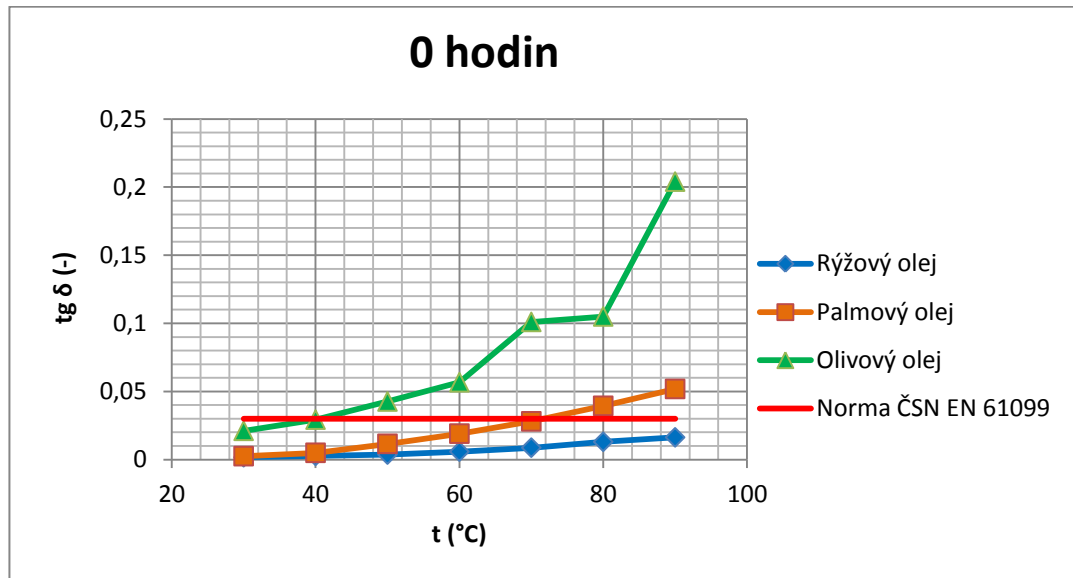


Obr. 8 Teplotní závislost ztrátového činitele pro rýžový olej



Tab. 5. Naměřené hodnoty ztrátového činitele pro exotické rostlinné oleje

| 0 hodin | Rýžový olej | Palmový olej | Olivový olej |
|---------|-------------|--------------|--------------|
| 30 °C   | 0,00166     | 0,00246      | 0,02105      |
| 40 °C   | 2,69E-03    | 0,00491      | 0,0293       |
| 50 °C   | 3,63E-03    | 0,0115       | 0,0426       |
| 60 °C   | 5,77E-03    | 0,019        | 0,0567       |
| 70 °C   | 8,70E-03    | 0,028        | 0,101        |
| 80 °C   | 1,30E-02    | 0,0394       | 0,105        |
| 90 °C   | 1,63E-02    | 0,0518       | 0,204        |



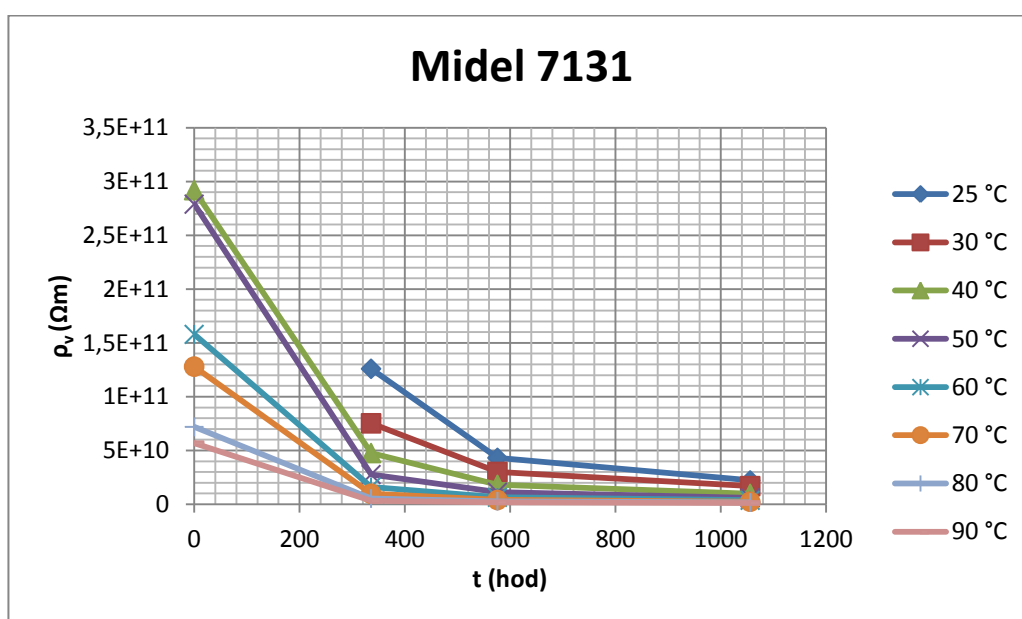
Obr. 9 Teplotní závislost ztrátového činitele pro exotické rostlinné oleje

## Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity

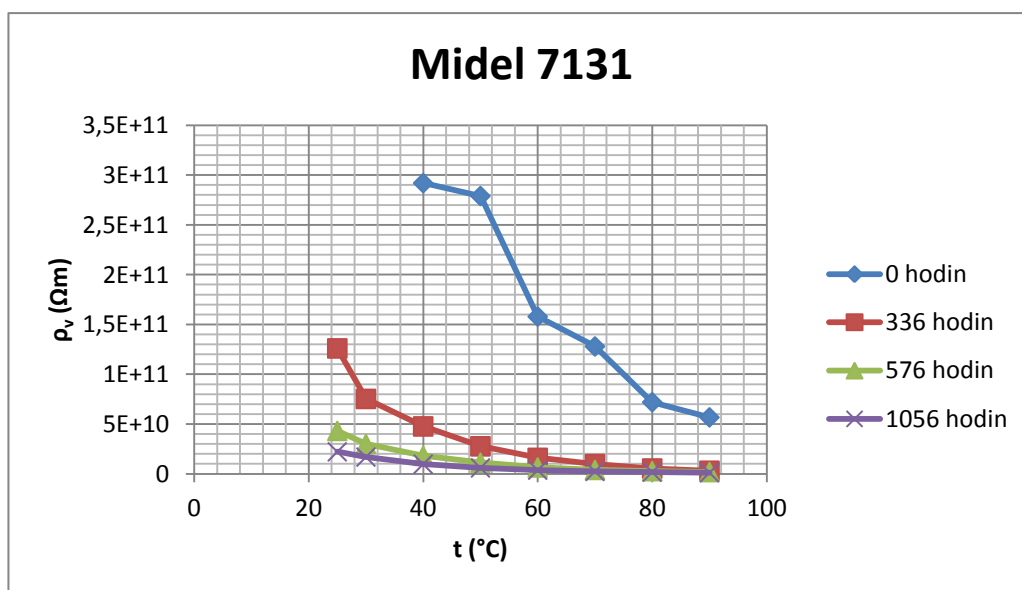
### Syntetický olej

Tab. 6. Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity pro olej MIDEL 7131

| MIDEL 7131 | 0 hodin | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|------------|---------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C      | 0,00036 | 0,0015    | 0,003675  | 0,0068     |
| 30 °C      | 0,00046 | 0,0023    | 0,00435   | 0,0081     |
| 40 °C      | 0,00067 | 0,00358   | 0,00743   | 0,0138     |
| 50 °C      | 0,00076 | 0,0059    | 0,0116    | 0,02175    |
| 60 °C      | 0,00144 | 0,00795   | 0,01938   | 0,03655    |
| 70 °C      | 0,00225 | 0,01595   | 0,03052   | 0,0549     |
| 80 °C      | 0,00389 | 0,02905   | 0,04685   | 0,0818     |
| 90 °C      | 0,00597 | 0,0508    | 0,07045   | 0,11135    |



Obr. 10 Časová závislost vnitřní rezistivity pro olej MIDEL 7131

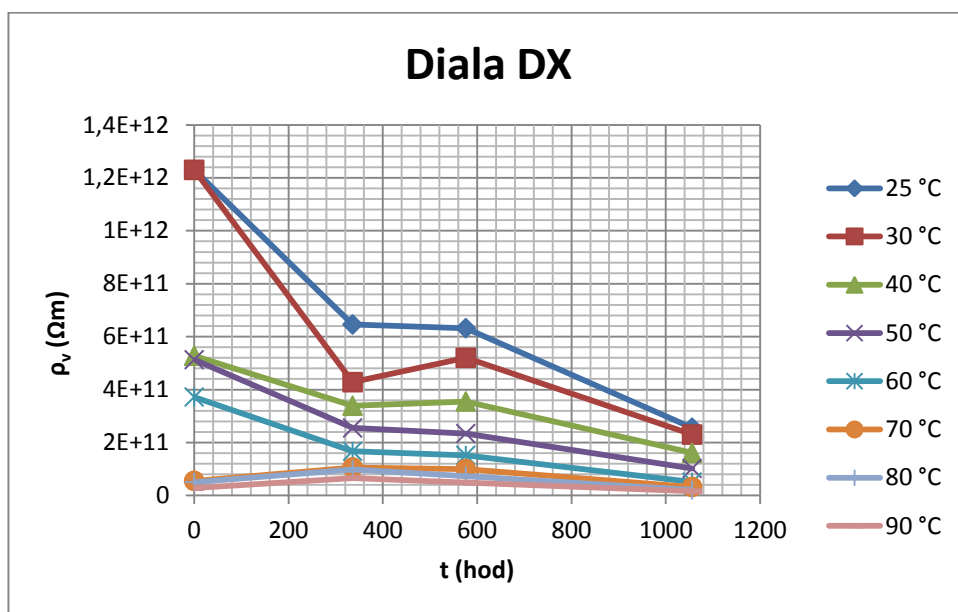


Obr. 11 Teplotní závislost vnitřní rezistivity pro olej MIDEL 7131

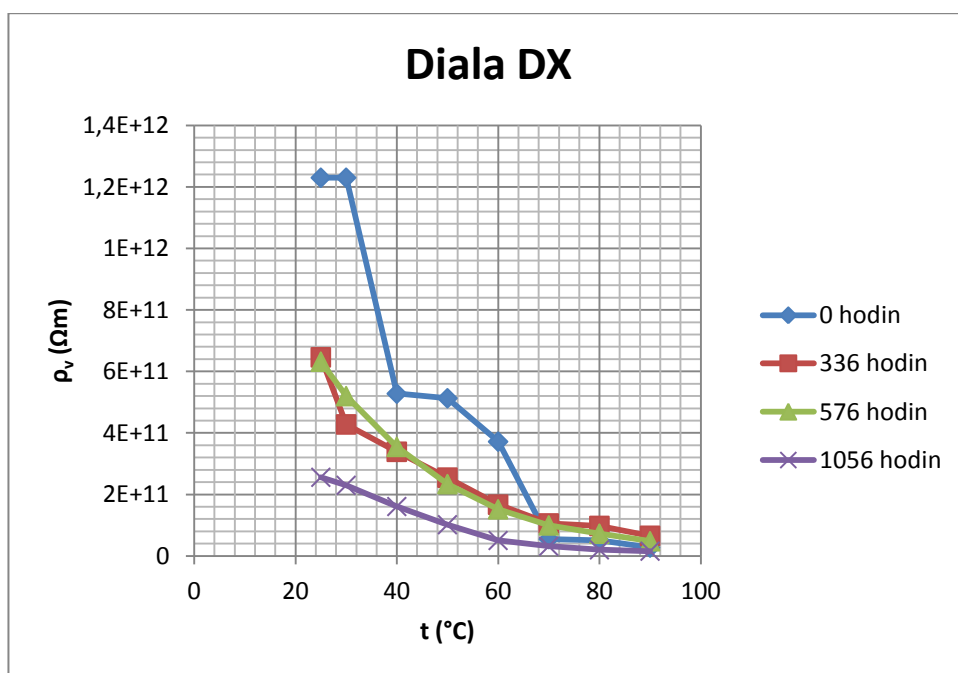
**Minerální olej**

**Tab. 7. Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity pro olej DIALA DX**

| DIALA DX | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|----------|----------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C    | 1,23E+12 | 6,46E+11  | 6,32E+11  | 2,56E+11   |
| 30 °C    | 1,23E+12 | 4,28E+11  | 5,2E+11   | 2,3E+11    |
| 40 °C    | 5,28E+11 | 3,39E+11  | 3,55E+11  | 1,61E+11   |
| 50 °C    | 5,13E+11 | 2,55E+11  | 2,34E+11  | 1,02E+11   |
| 60 °C    | 3,72E+11 | 1,67E+11  | 1,52E+11  | 5,06E+10   |
| 70 °C    | 5,52E+10 | 1,06E+11  | 9,96E+10  | 3,2E+10    |
| 80 °C    | 5,04E+10 | 9,79E+10  | 7,27E+10  | 2,03E+10   |
| 90 °C    | 2,76E+10 | 6,58E+10  | 4,82E+10  | 1,58E+10   |



**Obr. 12 Časová závislost vnitřní rezistivity pro olej DIALA DX**

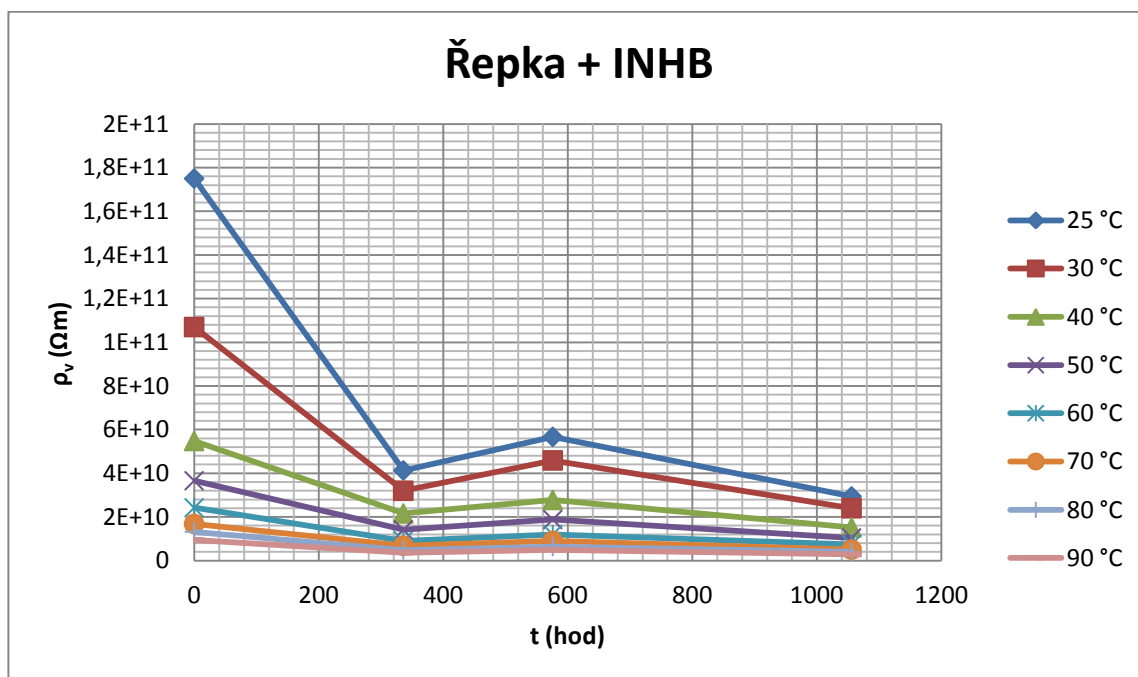


**Obr. 13 Teplotní závislost vnitřní rezistivity pro olej DIALA DX**

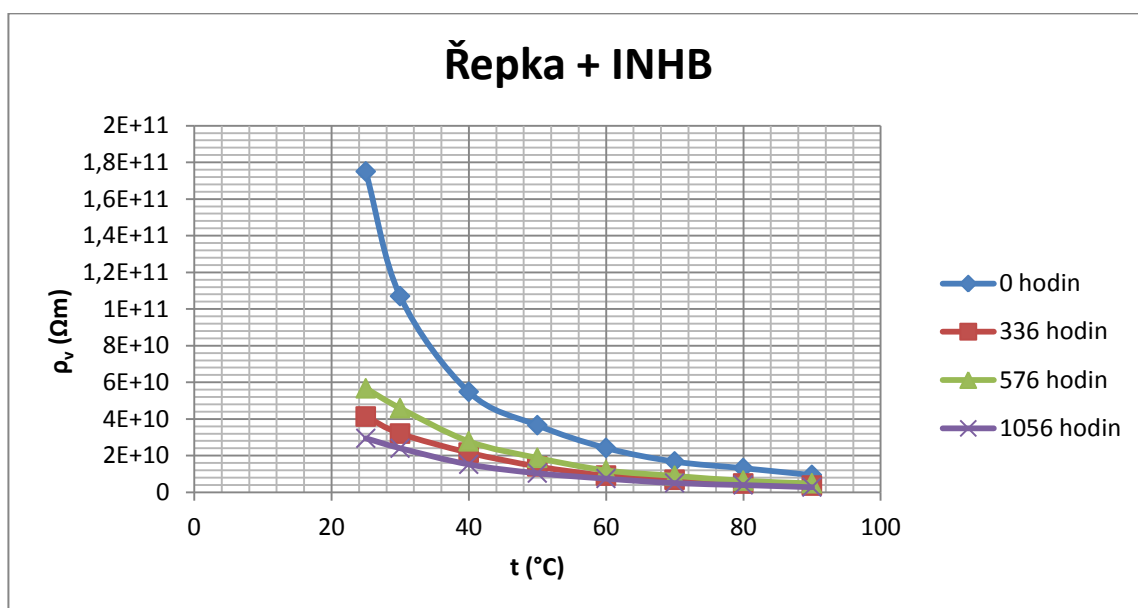
## Rostlinné oleje

Tab. 8. Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

| Řepka + INHB | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|--------------|----------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C        | 1,75E+11 | 4,13E+10  | 5,67E+10  | 2,94E+10   |
| 30 °C        | 1,07E+11 | 3,2E+10   | 4,59E+10  | 2,4E+10    |
| 40 °C        | 5,48E+10 | 2,16E+10  | 2,78E+10  | 1,52E+10   |
| 50 °C        | 3,66E+10 | 1,41E+10  | 1,88E+10  | 1,04E+10   |
| 60 °C        | 2,42E+10 | 9,08E+09  | 1,2E+10   | 7,47E+09   |
| 70 °C        | 1,68E+10 | 6,81E+09  | 9,01E+09  | 5,05E+09   |
| 80 °C        | 1,32E+10 | 4,76E+09  | 6,37E+09  | 4E+09      |
| 90 °C        | 9,45E+09 | 3,63E+09  | 4,91E+09  | 2,81E+09   |



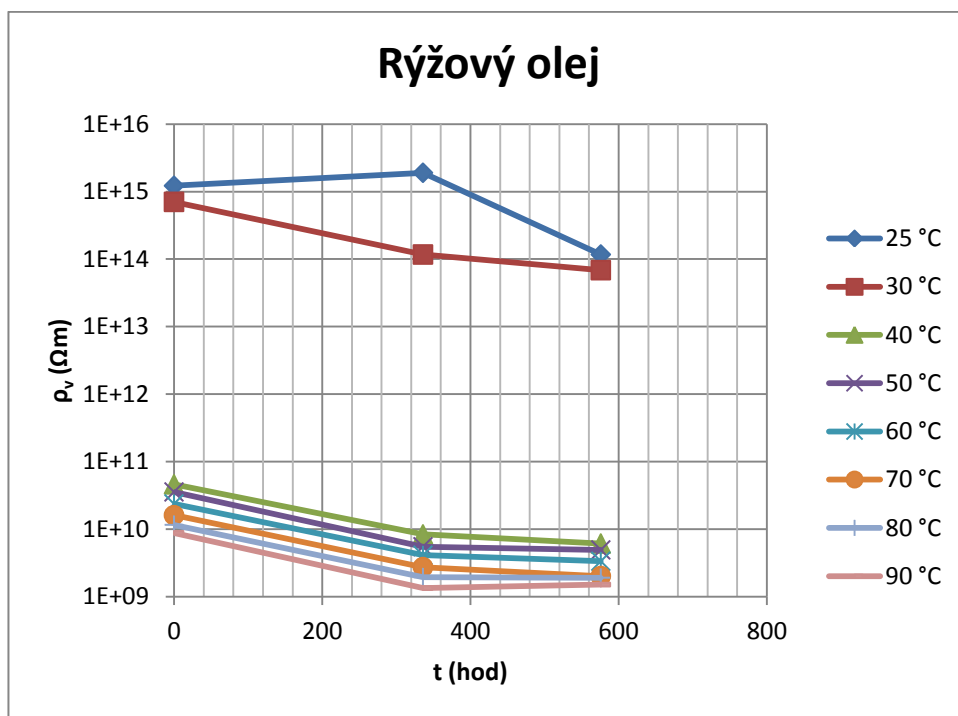
Obr. 14 Časová závislost vnitřní rezistivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru



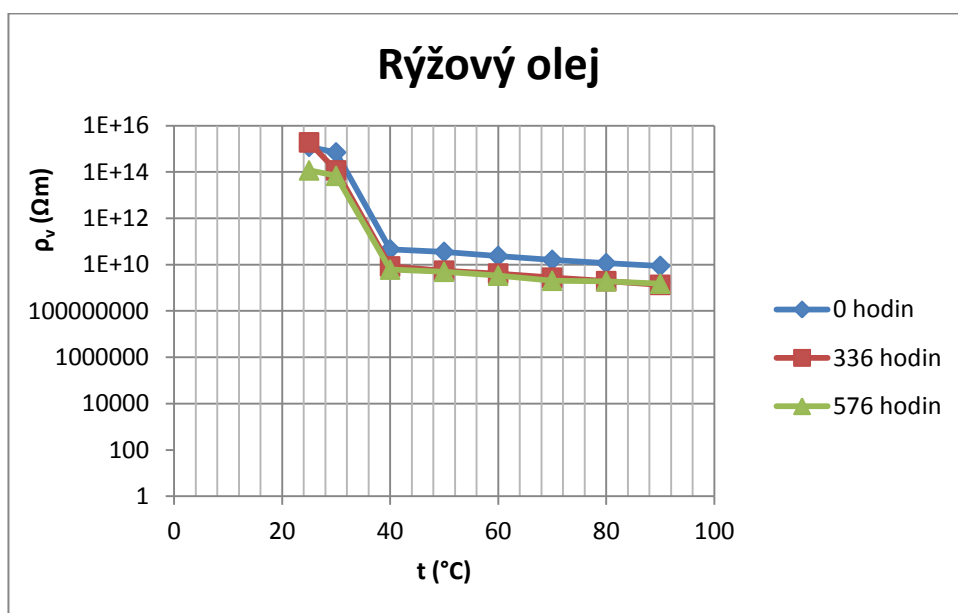
Obr. 15 Teplotní závislost vnitřní rezistivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

Tab. 9. Naměřené hodnoty vnitřní rezistivity pro rýžový olej

| Rýžový olej | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| 25 °C       | 1,22E+15 | 1,9E+15   | 1,17E+14  |
| 30 °C       | 7,04E+14 | 1,17E+14  | 6,86E+13  |
| 40 °C       | 4,61E+10 | 8,37E+09  | 6,13E+09  |
| 50 °C       | 3,56E+10 | 5,50E+09  | 4,93E+09  |
| 60 °C       | 2,37E+10 | 4,12E+09  | 3,35E+09  |
| 70 °C       | 1,61E+10 | 2,74E+09  | 2,02E+09  |
| 80 °C       | 1,16E+10 | 1,94E+09  | 1,91E+09  |
| 90 °C       | 8,81E+09 | 1,34E+09  | 1,51E+09  |



Obr. 16 Časová závislost vnitřní rezistivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru



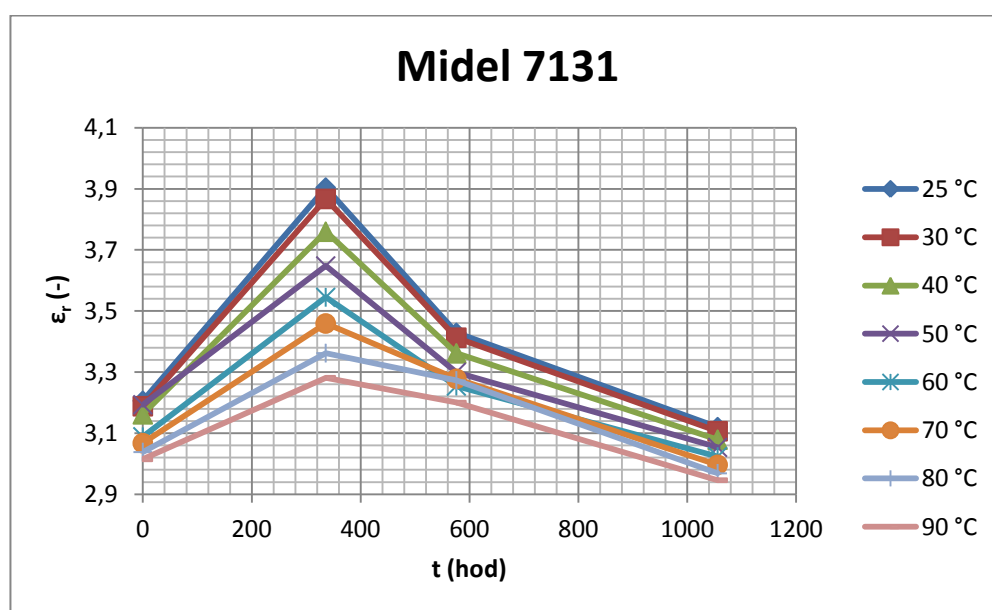
Obr. 17 Teplotní závislost vnitřní rezistivity pro rýžový olej

## Naměřené hodnoty relativní permittivity

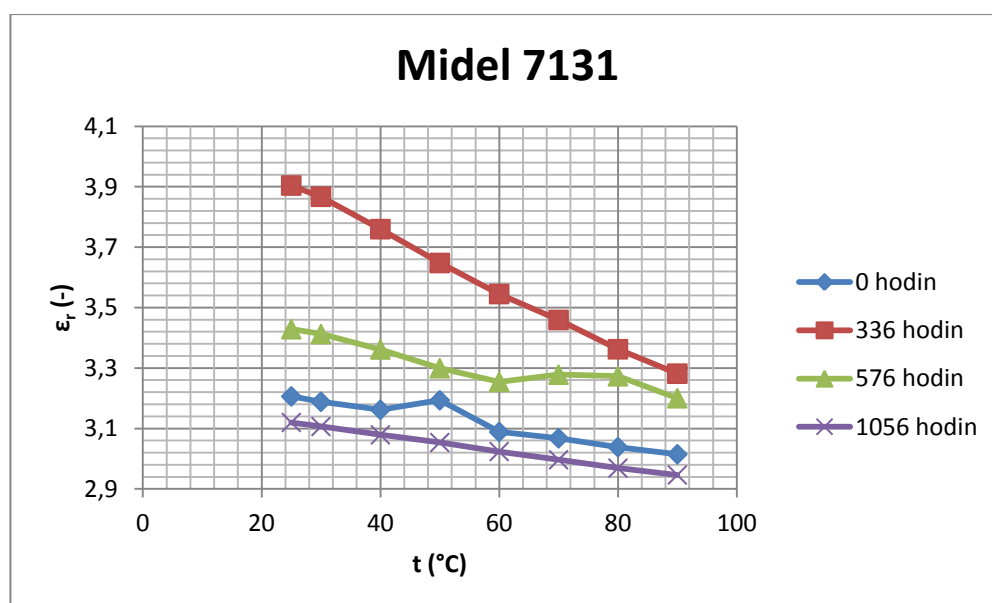
### Syntetický olej

Tab. 10. Naměřené hodnoty relativní permittivity pro olej MIDEL 7131

| MIDEL 7131 | 0 hodin   | 336 hodin  | 576 hodin | 1056 hodin |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 25 °C      | 3,2062381 | 3,90411494 | 3,42865   | 3,11993    |
| 30 °C      | 3,1883892 | 3,86697603 | 3,412643  | 3,106555   |
| 40 °C      | 3,1619535 | 3,75968118 | 3,361571  | 3,079007   |
| 50 °C      | 3,1933374 | 3,64777121 | 3,299546  | 3,053622   |
| 60 °C      | 3,0885932 | 3,54496792 | 3,254318  | 3,023706   |
| 70 °C      | 3,0675035 | 3,45925004 | 3,278194  | 2,996524   |
| 80 °C      | 3,0382577 | 3,36224    | 3,272787  | 2,968769   |
| 90 °C      | 3,014736  | 3,28148586 | 3,200127  | 2,946202   |



Obr. 18 Časová závislost relativní permittivity pro olej MIDEL 7131

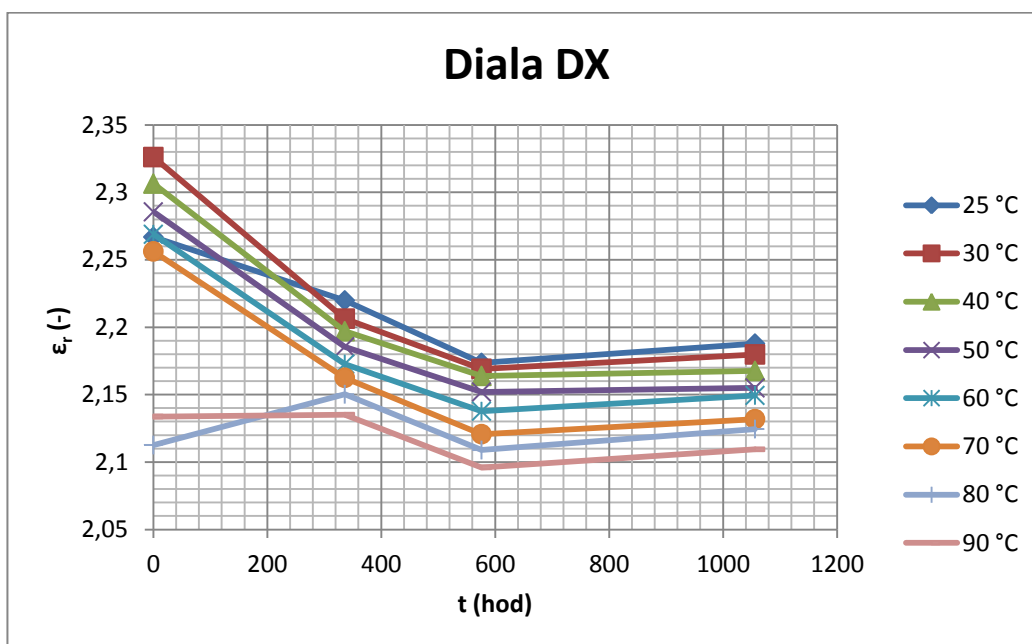


Obr. 19 Teplotní závislost relativní permittivity pro olej MIDEL 7131

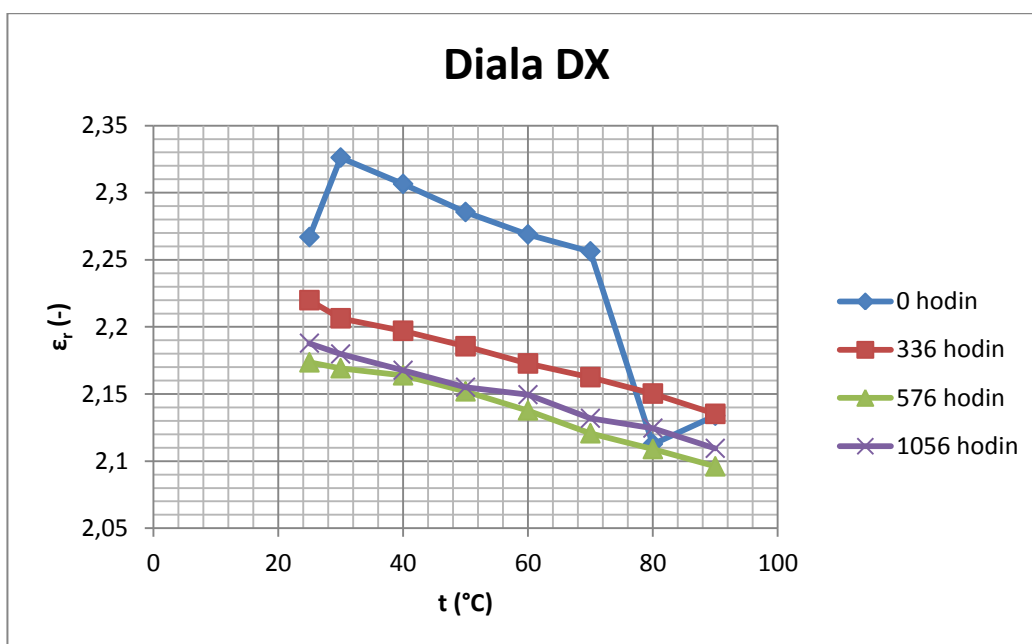
**Minerální olej**

**Tab. 11. Naměřené hodnoty relativní permitivity pro olej DIALA DX**

| DIALA DX | 0 hodin   | 336 hodin | 576 hodin  | 1056 hodin |
|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| 25 °C    | 2,2668952 | 2,2198544 | 2,17353504 | 2,18780082 |
| 30 °C    | 2,3261224 | 2,2063366 | 2,16915034 | 2,179789   |
| 40 °C    | 2,31E+00  | 2,1970296 | 2,16388391 | 2,16759873 |
| 50 °C    | 2,29E+00  | 2,1855057 | 2,1519256  | 2,15498664 |
| 60 °C    | 2,27E+00  | 2,172685  | 2,13771137 | 2,14942825 |
| 70 °C    | 2,26E+00  | 2,1624801 | 2,12068388 | 2,13183252 |
| 80 °C    | 2,11E+00  | 2,1502602 | 2,10890379 | 2,12449543 |
| 90 °C    | 2,13E+00  | 2,1351097 | 2,09604058 | 2,10943762 |



**Obr. 20 Časová závislost relativní permitivity pro olej DIALA DX**

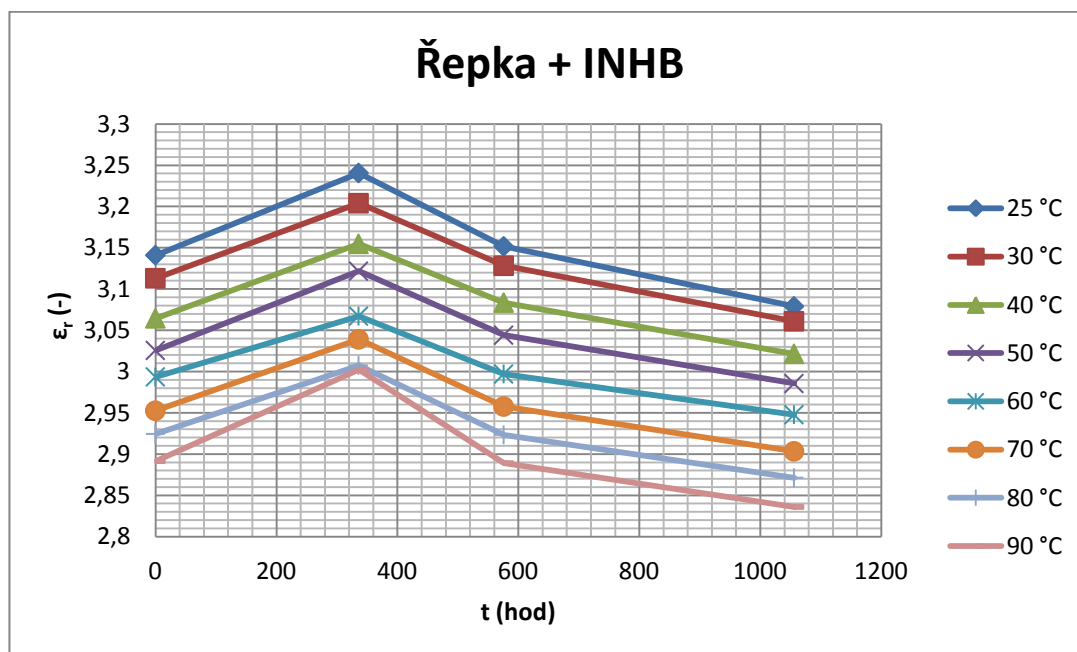


**Obr. 21 Teplotní závislost relativní permitivity pro olej DIALA DX**

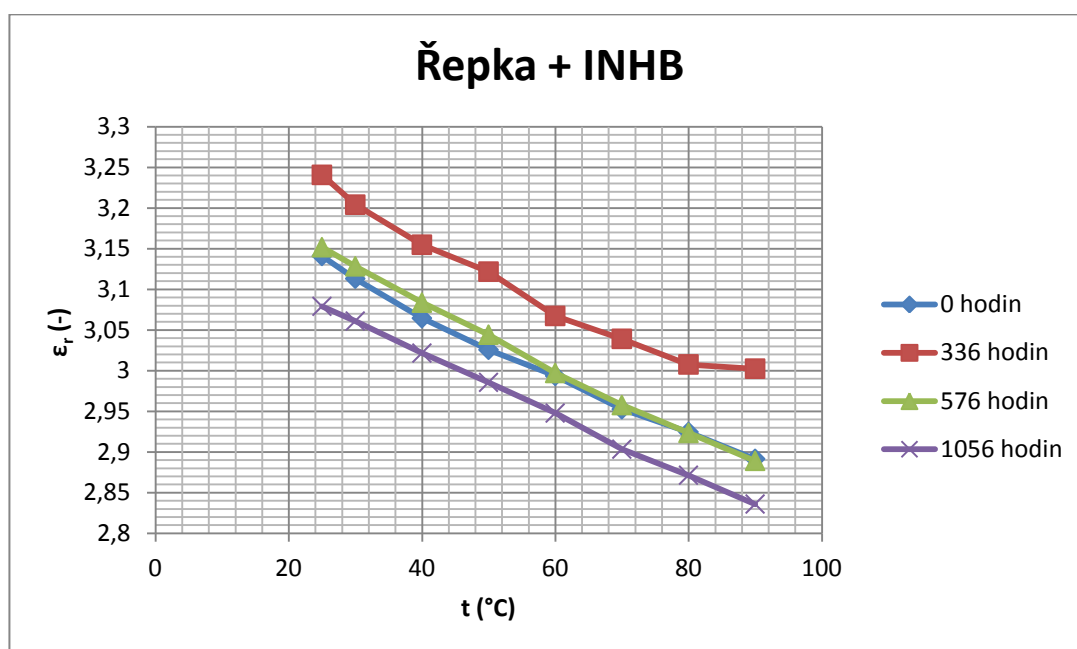
## Rostlinné oleje

Tab. 12. Naměřené hodnoty relativní permitivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

| Řepka + INHB | 0 hodin   | 336 hodin | 576 hodin | 1056 hodin |
|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 25 °C        | 3,1409797 | 3,2406507 | 3,1517306 | 3,0790073  |
| 30 °C        | 3,1130655 | 3,2040191 | 3,1282456 | 3,0609122  |
| 40 °C        | 3,064461  | 3,1547732 | 3,0835646 | 3,0215132  |
| 50 °C        | 3,0256271 | 3,1216832 | 3,04414   | 2,9855202  |
| 60 °C        | 2,9935638 | 3,0672212 | 2,9970629 | 2,9477656  |
| 70 °C        | 2,9525176 | 3,0390408 | 2,9576103 | 2,9033476  |
| 80 °C        | 2,9244384 | 3,007555  | 2,9233612 | 2,8713355  |
| 90 °C        | 2,8914102 | 3,0023539 | 2,8890445 | 2,835914   |



Obr. 22 Časová závislost relativní permitivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

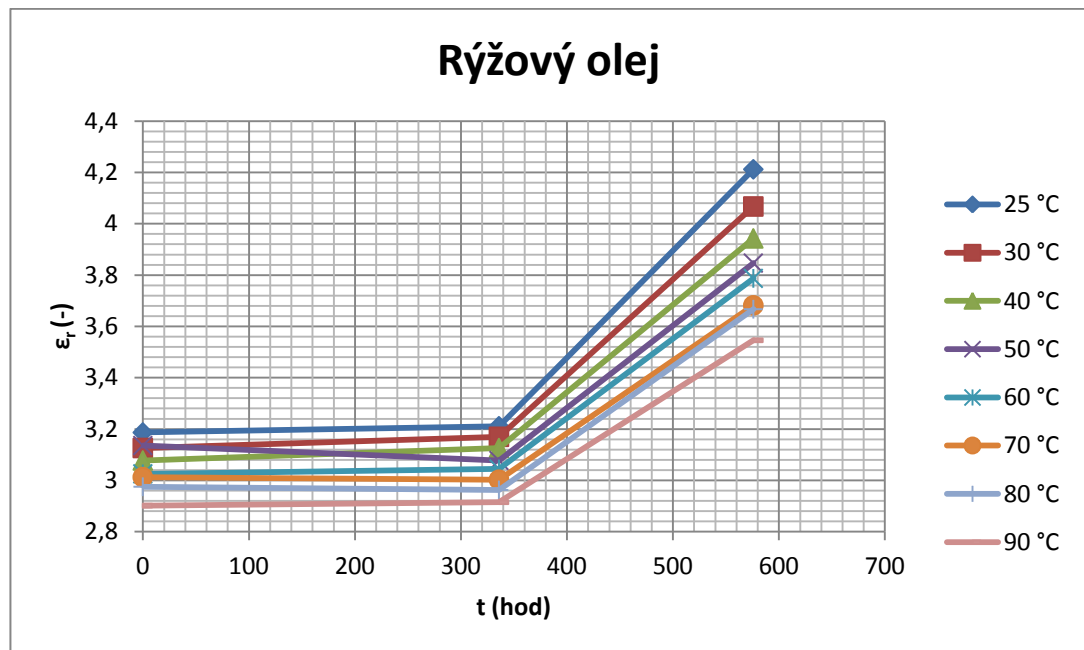


Obr. 23 Teplotní závislost relativní permitivity pro řepkový olej s obsahem inhibitoru

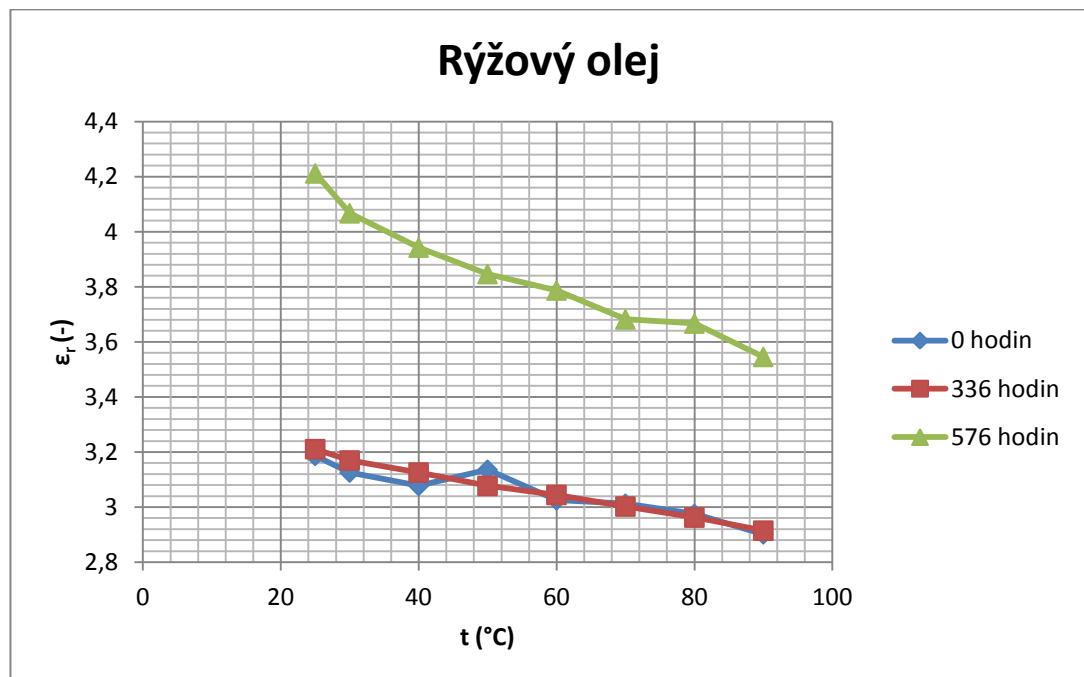


Tab. 13. Naměřené hodnoty relativní permitivity pro rýžový olej

| Rýžový olej | 0 hodin  | 336 hodin | 576 hodin |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| 25 °C       | 3,186439 | 3,210685  | 4,211945  |
| 30 °C       | 3,126016 | 3,17E+00  | 4,067124  |
| 40 °C       | 3,08E+00 | 3,13E+00  | 3,94E+00  |
| 50 °C       | 3,14E+00 | 3,08E+00  | 3,85E+00  |
| 60 °C       | 3,03E+00 | 3,04E+00  | 3,79E+00  |
| 70 °C       | 3,01E+00 | 3,00E+00  | 3,68E+00  |
| 80 °C       | 2,98E+00 | 2,96E+00  | 3,67E+00  |
| 90 °C       | 2,90E+00 | 2,91E+00  | 3,55E+00  |



Obr. 24 Časová závislost relativní permitivity pro rýžový olej

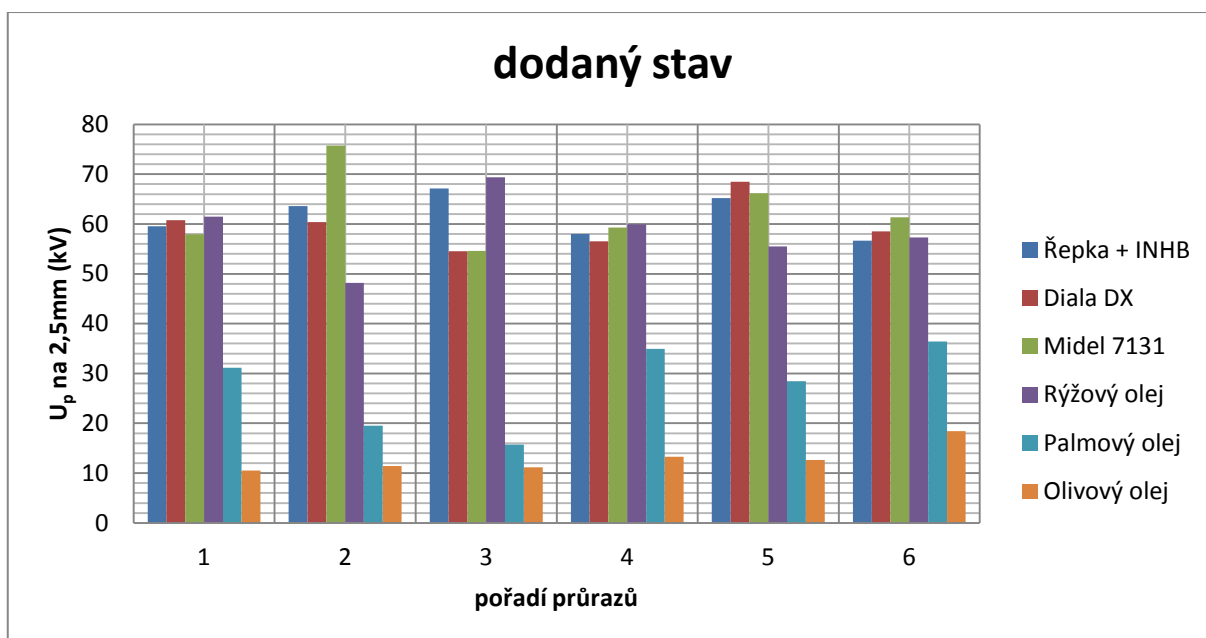


Obr. 25 Teplotní závislost relativní permitivity pro rýžový olej

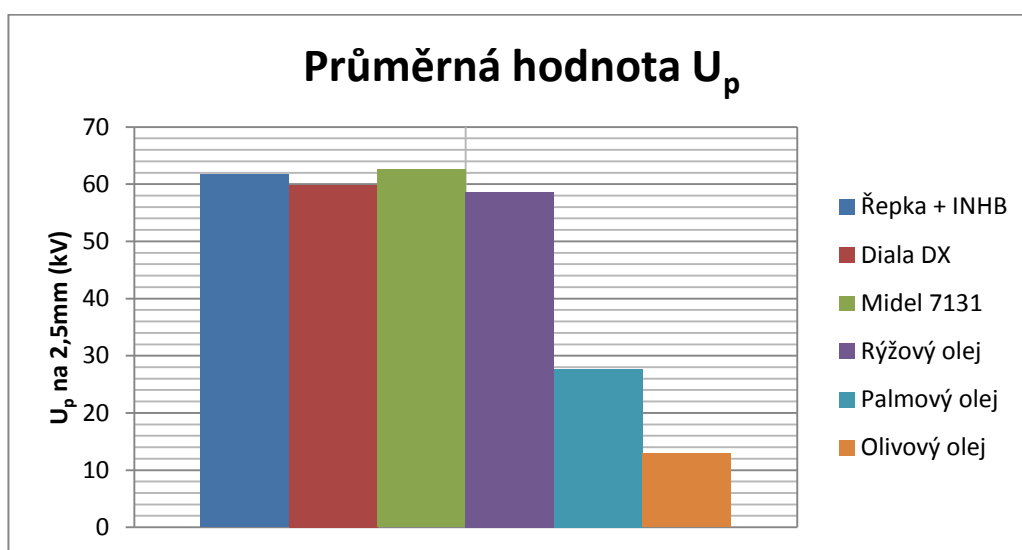
## Naměřené hodnoty průrazného napětí

Tab. 14. Naměřené hodnoty průrazného napětí pro zkoumané oleje

| Up [kV]             | Řepkový olej + INHB | DIALA DX | MIDEL 7131 | Rýžový olej | Palmový olej | Olivový olej |
|---------------------|---------------------|----------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 1                   | 59,55               | 60,78    | 57,95      | 61,47       | 31,17        | 10,5         |
| 2                   | 63,57               | 60,39    | 75,75      | 48,15       | 19,53        | 11,43        |
| 3                   | 67,14               | 54,52    | 54,57      | 69,36       | 15,7         | 11,19        |
| 4                   | 58,02               | 56,54    | 59,29      | 59,91       | 34,96        | 13,26        |
| 5                   | 65,23               | 68,45    | 66,16      | 55,49       | 28,48        | 12,63        |
| 6                   | 56,67               | 58,53    | 61,35      | 57,3        | 36,44        | 18,43        |
| Průměr              | 61,69667            | 59,86833 | 62,51167   | 58,61333    | 27,71333     | 12,90667     |
| Variační koeficient | 0,06839             | 0,080531 | 0,120599   | 0,119742    | 0,302971     | 0,22356      |

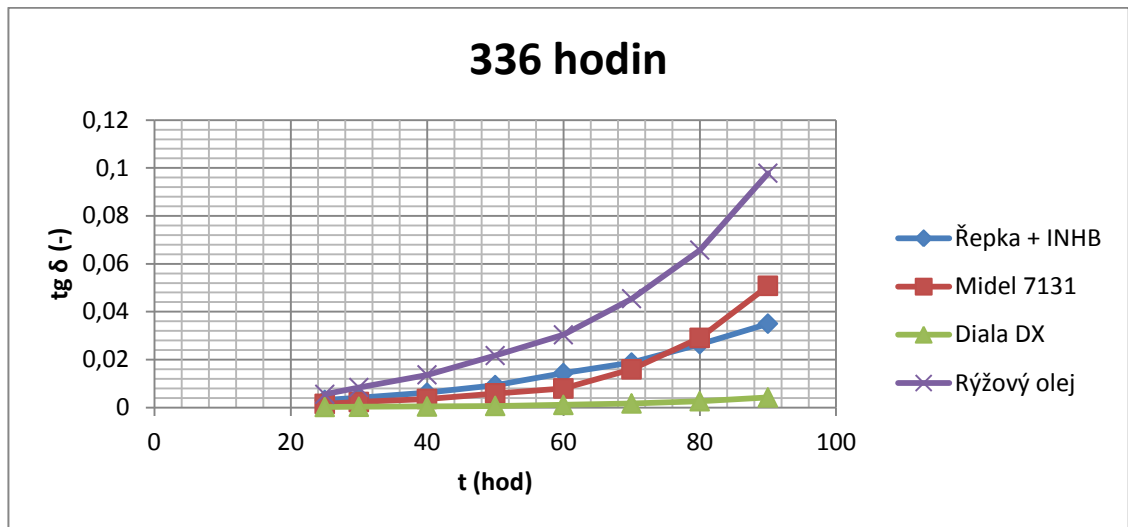


Obr. 26 Naměřené hodnoty průrazného napětí pro zkoumané oleje na počátku experimentu

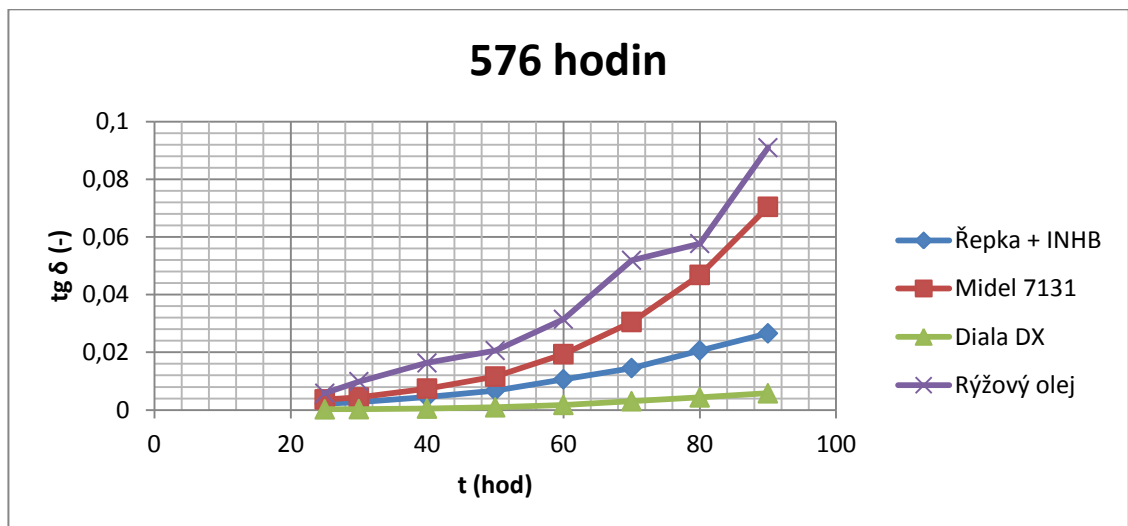


Obr. 27 Průměrné hodnoty průrazného napětí zkoumaných olejů na počátku experimentu

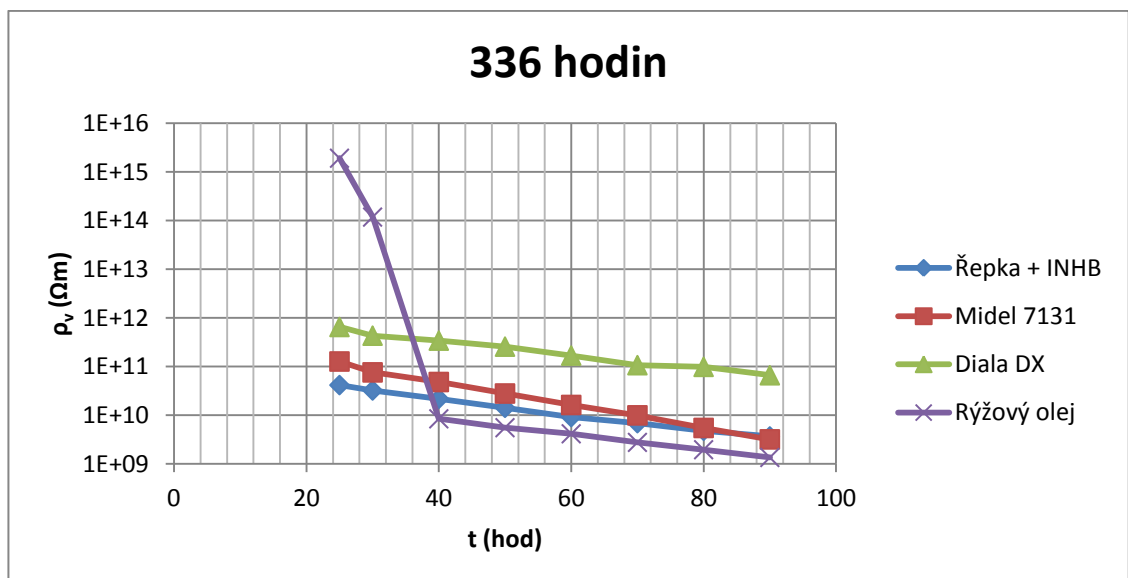
### Průběžné porovnání zrychleného tepelného stárnutí



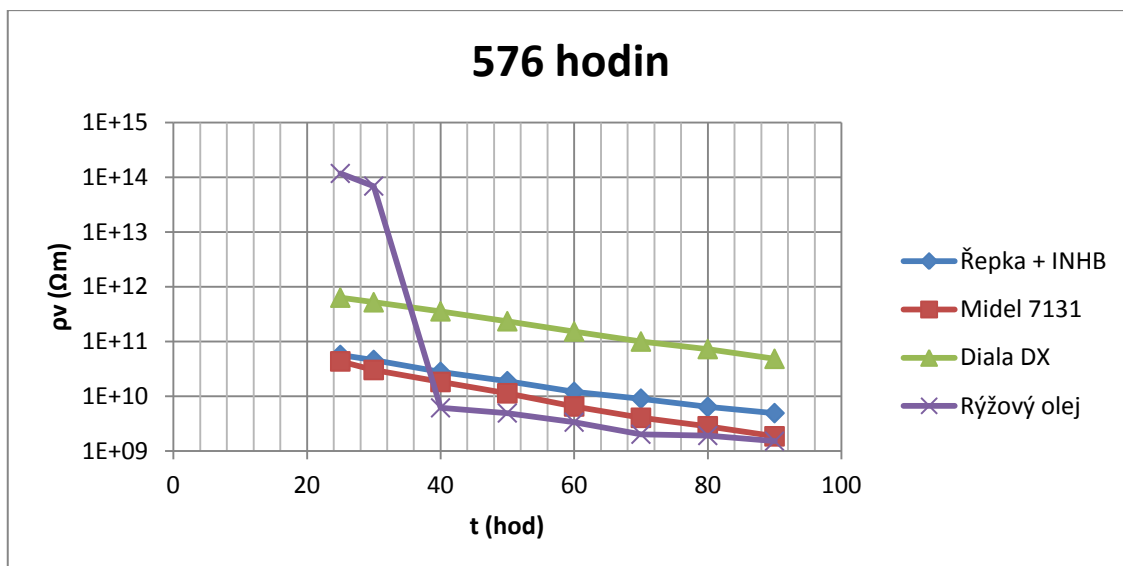
Obr. 28 Teplotní závislost ztrátového činitele při 336 hodinách tepelného stárnutí



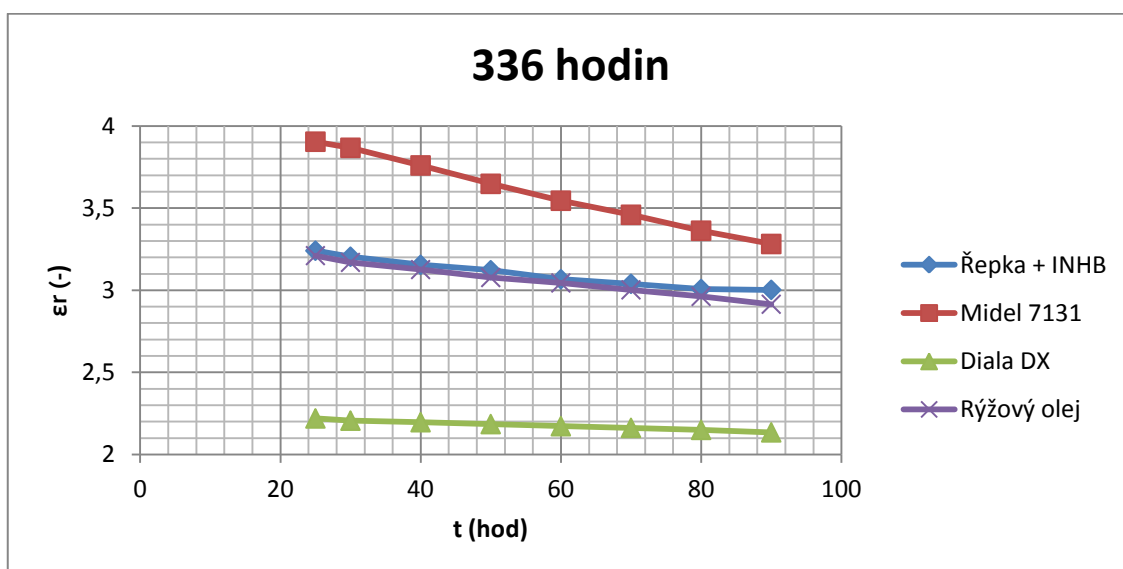
Obr. 29 Teplotní závislost ztrátového činitele při 576 hodinách tepelného stárnutí



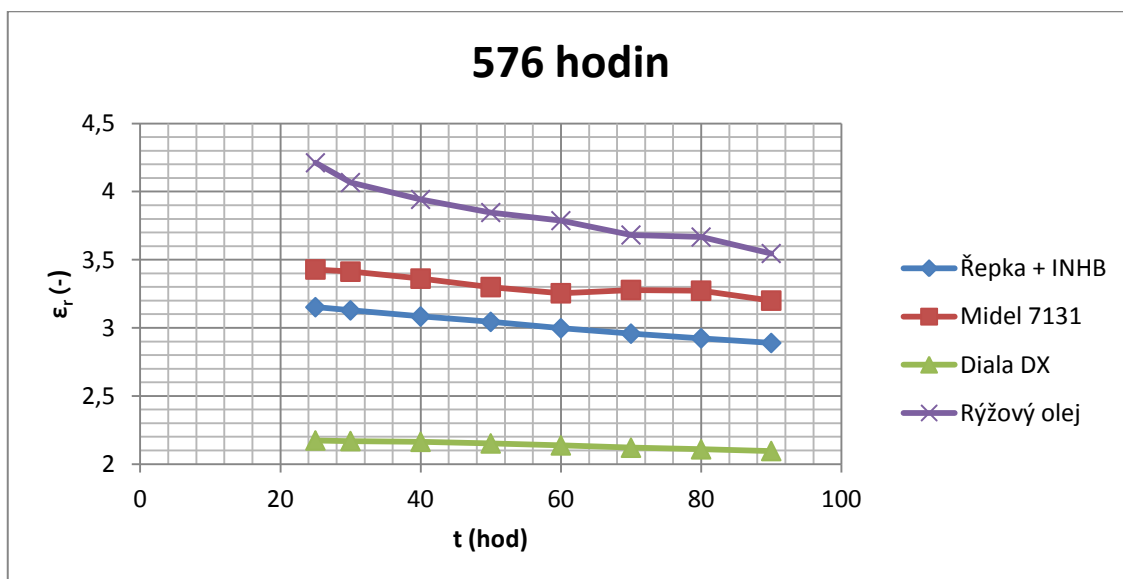
Obr. 30 Teplotní závislost vnitřní rezistivity při 336 hodinách tepelného stárnutí



Obr. 31 Teplotní závislost vnitřní rezistivity při 576 hodinách tepelného stárnutí



Obr. 32 Teplotní závislost relativní permitivity při 336 hodinách tepelného stárnutí



Obr. 33 Teplotní závislost relativní permitivity při 576 hodinách tepelného stárnutí