

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh zařízení pro měření permitivity tekutin**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Kristýna KHODLOVÁ**  
Osobní číslo: **E15N0016P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh zařízení pro měření permitivity tekutin**  
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 problematiku měření materiálových vlastností látek.
2. Formulujte problém, sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro výpočet.
3. Realizujte výpočet v programu založeném na MKP.
4. Navrhněte ověřovací experiment.
5. Srovnajte obdržené výsledky s naměřenými hodnotami.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mayer, D., Polák, J.: Metody řešení elektrických a magnetických polí

Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Hamar, Ph.D.


Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh zařízení na měření permitivity tekutin. Práce je členěna na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou stručně popsány kapalně izolanty, dále je zde rozebrána problematika základních dielektrických vlastností a popsány můstkové metody určené pro měření kapacity elektroizolačních tekutin. Praktická část je zaměřena na samotný návrh zařízení a jeho výrobu, následně je vyrobené zařízení experimentálně ověřeno na čtyřech vzorkách kapalin.

## **Klíčová slova**

Relativní permitivita, elektrická kapacita, elektrodový systém, elektroizolační oleje

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on the design of the device for measurement of fluid permittivity. The thesis consists of a theoretical part and a practical part. In the theoretical part, liquid – insulating materials are briefly described, basic dielectric properties are analysed and abdominal methods for measuring the capacity of electrical insulating fluids are covered. The practical part is focused on the design of the device itself and its fabrication, after which the device is experimentally tested on four samples of liquids.

## **Keywords**

Relative permittivity, electrical capacity, electrode system, electrical insulating oils

## **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 17.5.2017

Bc. Kristýna Khodlová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Romanovi Hamarovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Zároveň děkuji doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za poskytnutí olejů k testování zařízení a cenné rady.

Zároveň bych tímto ráda poděkovala všem pedagogům Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni, kteří mi během studia předávali své znalosti a zkušenosti. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a svým blízkým za trpělivost a podporu během celého mého studia.

# Obsah

ÚVOD .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	10
<b>1 KAPALNÉ IZOLANTY.....</b>	<b>12</b>
1.1 ROSTLINNÉ OLEJE .....	12
1.2 MINERÁLNÍ OLEJE.....	12
1.3 SYNTETICKÉ OLEJE .....	13
<b>2 KAPALNÁ DIELEKTRIKA.....</b>	<b>14</b>
2.1 PERMITIVITA.....	14
2.2 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	15
2.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY .....	16
2.4 POLARIZACE .....	16
2.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	17
<b>3 METODY MĚŘENÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY .....</b>	<b>18</b>
3.1 MŮSTKOVÉ METODY.....	18
3.1.1 Metoda Scheringova můstku .....	18
3.1.2 Metoda čtyřkapacitního můstku .....	19
3.2 ELEKTRODOVÉ SYSTÉMY PRO KAPALNÉ IZOLANTY .....	20
3.3 MATERIÁLY ELEKTRODOVÝCH SYSTÉMŮ .....	21
<b>4 FORMULACE PROBLÉMU .....</b>	<b>22</b>
4.1 MATEMATICKÝ MODEL A ALGORITMUS VÝPOČTU .....	22
4.2 NUMERICKÝ MODEL .....	23
4.3 VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU .....	26
<b>5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>30</b>
5.1 HLAVNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ A ROZMĚRY .....	30
5.2 ZPŮSOBY OHŘEVU .....	32
5.3 FINANČNÍ PLÁN.....	34
5.4 POSTUP VÝROBY.....	34
5.5 VÝHODY A NEVÝHODY ZAŘÍZENÍ.....	36
<b>6 EXPERIMENT .....</b>	<b>37</b>
6.1 MĚŘICÍ PRACOVÍŠTĚ .....	37
6.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	38
<b>7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PERMITIVITY VYBRANÝCH OLEJŮ .....</b>	<b>40</b>
7.1 SHELL DIALA DX .....	40
7.2 PARAMO TRAFO N.....	41
7.3 MIDEL 7131.....	42
7.4 SLUNEČNICOVÝ OLEJ .....	43
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>46</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>I</b>



<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>II</b>
P. 1: SHELL DIALA DX: NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	II
P. 2: SHELL DIALA DX: VYPOČÍTANÉ HODNOTY.....	III
P. 3: SHELL DIALA DX: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA TEPLITĚ .....	IV
P. 4: SHELL DIALA DX: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA FREKVENCI .....	V
P. 5: PARAMO TRAFON: NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	VI
P. 6: PARAMO TRAFON: VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	VII
P. 7: PARAMO TRAFON: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA TEPLITĚ .....	VIII
P. 8: PARAMO TRAFON: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA FREKVENCI.....	IX
P. 9: MIDEL 7131: NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	X
P. 10: MIDEL 7131: VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	XI
P. 11: MIDEL 7131: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA TEPLITĚ.....	XII
P. 12: MIDEL 7131: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA FREKVENCI.....	XIII
P. 13: SLUNEČNICOVÝ OLEJ: NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	XIV
P. 14: SLUNEČNICOVÝ OLEJ: VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	XV
P. 15: SLUNEČNICOVÝ OLEJ: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA TEPLITĚ.....	XVI
P. 16: SLUNEČNICOVÝ OLEJ: ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMITIVITY NA FREKVENCI.....	XVII
P. 17: PROGRAM VYTVOŘENÝ V PROSTŘEDÍ MATLAB.....	XVIII

## Úvod

V technické praxi se pro měření permitivity tekutin používají profesionální přístroje, které jsou velmi finančně náročné. Jedním ze známějších na trhu je přístroj Tettex, jehož cena se pohybuje okolo dvou milionů korun. Cílem této práce je navrhnout a vyrobit zařízení, které bude plnit stejný účel, avšak bude cenově dostupnější. Následné experimentální ověření funkčnosti vyrobeného zařízení je součástí vytyčeného cíle.

Předkládaná práce je rozčleněna na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se nejdříve popisují druhy kapalných izolantů, kterými jsou rostlinné, minerální a syntetické oleje. Zároveň jsou popsány sledované charakteristické vlastnosti, jako jsou permitivita, ztrátový činitel, dielektrické ztráty, polarizace a elektrická pevnost. Poté je uvedena problematika současných elektrodových systémů a metod pro měření relativní permitivity kapalin. Teoretická část končí formulací problému a vytvořením matematického a numerického modelu. Praktická část se zabývá samotným návrhem zařízení pro měření permitivity tekutin. Nejprve je zaměřena na hlavní části zařízení a jeho rozměry; nechybí také způsoby ohřevu, finanční plán a postup výroby. Nakonec je popsán experiment, kterým je ověřena funkčnost vyrobeného zařízení na několika vzorcích olejů. Výsledky experimentu jsou podrobeny analýze a porovnány s hodnotami uváděnými výrobcí olejů.

Pro realizaci cíle této práce byly použity prameny uvedené v seznamu literatury. K řešení matematického modelu byly vybrány profesionální programy COMSOL Multiphysics a MATLAB. Tato práce by mohla být pomůckou pro odborná pracoviště, která se zabývají měřením permitivity tekutin.

## Seznam symbolů a zkratek

$C$	elektrická kapacita	[F]
$C_0$	elektrická kapacita vzduchu	[F]
$C_c$	kalibrační elektrická kapacita	[F]
$C_g$	opravná elektrická kapacita	[F]
$C_n$	elektrická kapacita elektrodové soustavy po naplnění kalibrační kapalinou	[F]
$C_p$	elektrická kapacita přívodů	[F]
$C_s$	elektrická kapacita v sériovém zapojení	[F]
$C_x$	elektrická kapacita měřeného vzorku	[F]
$d$	vzdálenost elektrod	[m]
$D$	elektrická indukce	[C/m <sup>2</sup> ]
$E$	intenzita elektrického pole	[V/m]
$E_p$	elektrická pevnost	[V/m]
$\mathcal{E}$	permitivita	[-]
$\mathcal{E}_0$	permitivita vakua	[-]
$\mathcal{E}_n$	relativní permitivita kalibrační kapaliny	[-]
$\mathcal{E}_r$	relativní permitivita	[-]
$\mathcal{E}_x$	relativní permitivita neznámé kapaliny	[-]
$M$	dipólový moment	[C·m]
$n$	koncentrace indukovaných dipólových momentů	[m <sup>-3</sup> ]
$\mathbf{P}$	vektor elektrické polarizace	[C/m <sup>2</sup> ]
$Q$	elektrický náboj	[C]
$R$	elektrický odpor	[Ω]
$R_s$	elektrický odpor v sériovém zapojení	[Ω]
$\operatorname{tg} \delta$	ztrátový činitel	[-]
$T_t$	teplota tuhnutí	[°C]
$T_{vz}$	teplota vzplanutí	[°C]
$U$	elektrické napětí	[V]
$U_p$	průrazné napětí	[V]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$w_e$	hustota energie elektrického pole	[J/m <sup>3</sup> ]
$W_e$	energie elektrického pole	[J]

$\varphi$	elektrický potenciál	[V]
$\omega$	úhlový kmitočet	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$K$	dielektrická susceptibilita	[-]

# 1 Kapalné izolanty

Kapalné izolanty se vyznačují velkým využitím v elektrotechnice pro svoje vlastnosti. Používají se jako izolační kapaliny nebo jako chladicí média kvůli své dobré tepelné vodivosti a viskozitě. Podle vzniku se dělí na oleje syntetické, rostlinné a minerální. [1]

## 1.1 Rostlinné oleje

Původem se získávají ze semen rostlin a skládají se ze směsi esterů, glycerinů a mastných kyselin. Jsou dva druhy rozdělení rostlinných olejů, na vysychavé a nevysychavé. Mezi vysychavé se řadí olej lněný a dřevný. Mezi nevysychavé patří olej ricinový, který má v elektrotechnice větší využití. Používá se zejména k napouštění papírových kondenzátorů. Jeho relativní permitivita se pohybuje okolo hodnot  $3 \div 5$ . Mezi špatné vlastnosti vysychavých olejů je oxidace a polymerace v důsledku chemické reakce při absorbování kyslíku. V současnosti se používají pouze jako přísady do elektroizolačních laků [1, 2].

## 1.2 Minerální oleje

Minerální oleje vznikají destilací ropy, kde se následně provede odstranění nežádoucích příměsí. Druhem ropy je určovaná kvalita směsi uhlovodíků. Oleje se využívají jako izolační a chladicí medium, ale vlivem teploty, působení kyslíku, pohlcováním vody a plynů se zkracuje jejich životnost. Je nezbytné oleje kontrolovat a měnit. Pro různá použití jsou oleje upravovány. Dělí se na oleje transformátorové, kabelové a kondenzátorové. Transformátorový olej se mimo použití v transformátorech dále využívá ve spínačích, silových kondenzátorech a dalších strojů techniky vysokého napětí. U kabelových kondenzátorů je důležitá nízká viskozita při impregnaci a vysoká při vlastním provozu. Na ovlivnění této vlastnosti se používá syntetická pryskyřice nebo olejová kompauda s kalafunou. U kondenzátorových olejů je prioritní vysoká stabilita ztrátového činitele a relativní permitivity. V tab. 1.1 lze vidět vlastnosti minerálních olejů. [1, 2]

Tab. 1.1: Vlastnosti minerálních olejů ( $T_t$  – teplota tuhnutí,  $T_{vz}$  – teplota vzplanutí) [2]

olej	$T_t$ [°C]	$T_{vz}$ [°C]	$\epsilon_r$ při 20 °C	tg $\delta$ při 20 °C	$E_p$ [kV/mm]
Transformátorový BTA	$\leq -45$	$> 130$	2,1 ÷ 2,4	$\leq 0,015$	9,2 ÷ 20,0
Transformátorový BTS	-40	135	2,1 ÷ 2,4	0,015	9,2 ÷ 20,0
Kabelový	$\leq -8$	$> 220$	-	-	-
Kondenzátorový	$\leq -40$	$> 130$	2,1 ÷ 2,25	$< 0,0012$	$> 20,0$

### 1.3 Syntetické oleje

Syntetické kapaliny vznikly jako náhrada hořlavých minerálních olejů. Při výrobě je snaha dodržet ekologickou nezávadnost. [2] Syntetické kapaliny se dělí do 5 základních skupin [5]:

- Připravené polymerací nenasycených uhlovodíků,
- chlorované uhlovodíky,
- fluorované uhlovodíky,
- organické estery,
- silikonové oleje.

## 2 Kapalná dielektrika

Dielektrikum je látka, která si sama může vytvořit elektrické pole s možností polarizace. Toto je hlavní rozdíl mezi dielektrikem a izolantem. V praxi je většina dielektrik dobrými izolanty. Možnost vodivosti u kapalných dielektrik je větší než u pevných látek a větší než u plyných látek. Velký vliv zde mají různé nečistoty a struktury příměsí. [1] U kapalných dielektrik zjišťujeme vlastnosti popsané v následujících kapitolách.

### 2.1 Permittivita

Permittivita je schopnost materiálu se polarizovat. Celkovou permitivitu lze vypočítat součinem permitivity vakua  $\varepsilon_0$  a relativní permitivity  $\varepsilon_r$  (2.1.1). Permittivita vakua má stanovenou hodnotu na  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ . [2]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r \quad [\text{F/m}] \quad (2.1.1)$$

Relativní permittivita  $\varepsilon_r$  je poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a vakuem (2.1.2). Veličinu lze vyjádřit pomocí elektrické indukce a intenzity elektrického pole (2.1.3). [2]

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad [-] \quad (2.1.2)$$

$$D = \varepsilon_0 * E + P = \varepsilon_0 * (1 + K) * E = \varepsilon_0 * \varepsilon_r * E, \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.1.3)$$

kde  $D$  je elektrická indukce,

$P$  je elektrická polarizace,

$E$  je intenzita elektrického pole,

$K$  je dielektrická susceptibilita,

$\varepsilon_0$  je permittivita vakua,

$\varepsilon_r$  je relativní permittivita.

Není-li relativní permitivita závislá na intenzitě elektrického pole, jedná se o tzv. lineární dielektrika. V opačném případě se jedná o nelineární dielektrika a pro relativní permitivitu je vhodnější vzorec, kde je znázorněna závislost elektrické indukce na intenzitě elektrického pole (2.1.3). [2]

$$\varepsilon_r(E) = \frac{1}{\varepsilon_0} * \frac{dD}{dE} \quad [-] \quad (2.1.4)$$

kde  $D$  je elektrická indukce,

$E$  je intenzita elektrického pole,

$\varepsilon_0$  je permitivita vakua,

$\varepsilon_r$  je relativní permitivita.

## 2.2 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je jedním z nejdůležitějších ukazatelů k posouzení kvality dielektrika a ukazuje míru ztracené energie, která se změní v teplo. Značí se  $\text{tg } \delta$ , a pokud je jeho hodnota menší než  $10^{-3}$ , materiál je hodnocen jako dobrý. V případě, že hodnota  $\text{tg } \delta$  je větší než  $10^{-2}$ , materiál je nekvalitní. Velikost ztrátového činitele je závislá na teplotě, frekvenci a napětí. [2, 8]

Výpočet ztrátového činitele lze určit podle druhu zapojení. Paralelní náhradní obvod je vhodný v reálném kondenzátoru v širokém frekvenčním pásmu elektrické vodivosti. Velikost lze pak určit ze vztahu (2.2.1). Ze vztahu lze říct, že se zvyšující se frekvencí ztrátový činitel klesá podle tvaru hyperboly.[8]

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega * C * R} \quad (2.2.1)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet,

$C$  je elektrická kapacita,

$R$  je elektrický odpor.

V sériovém náhradním obvodu vznikají ztráty z odporů přívodů a elektrod. Při konstantní teplotě roste ztrátový činitel lineárně se vzrůstající frekvencí. Velikost  $\text{tg } \delta$  lze definovat dle vzorce (2.2.2). [8]



$$\operatorname{tg} \delta = \omega * C_s * R_s \quad (2.2.2)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet,

$C_s$  je elektrická kapacita v sériovém zapojení,

$R_s$  je elektrický odpor v sériovém zapojení.

### 2.3 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty se vyznačují přeměnou části energie na energii tepelnou, která je následkem srážení se nosičů nábojů s okolními částicemi. Tento jev je brán za velmi nežádoucí, jelikož důsledkem ohřevu nastává stárnutí izolace a dochází k degračním reakcím. V závislosti na měřených veličinách je důležitá volba tepelně odolného materiálu a zajištění odvodu tepelné energie. Zanedbání tohoto procesu může následně vést k tepelnému průrazu nebo zničení izolantu. Mezi faktory, které způsobují vznik dielektrických ztrát, jsou nečistoty a příměsi nebo chemické složení. [8]

Dielektrické ztráty v kapalných izolantech jsou ovlivněny druhem kapaliny. Kapaliny mohou být polární a nepolární, nebo mohou obsahovat různé příměsi a nečistoty. V nepolárních kapalinách se nachází jen elektronová polarizace, která nemá ztráty při běžných frekvencích. V polárních kapalných izolantech se nachází vodivostní ztráty a výrazné polarizační ztráty. [8]

### 2.4 Polarizace

Jedná se o děj, kdy jsou elektrické částice přitahovány opačně nabitými elektrodami, který nastává vložení tělesa do vnějšího elektrického pole. V případě kladných nábojů se posouvají částice vlivem působení Lorentzovy síly. Následkem polarizace je vznik elektrických dipólů. Spojením dvou nábojů s opačnou polaritou a stejné velikosti vznikne dipólový moment  $M$ , který je charakterizován součinem velikosti náboje a vzdálenosti mezi nimi (2.4.1). Směr dipólového momentu je stejný se směrem elektrického pole. [7]

$$M = Q * d \quad [\text{C}\cdot\text{m}] \quad (2.4.1)$$

kde  $Q$  je elektrický náboj,

$d$  je vzdálenost nábojů.

Elektrickou polarizaci lze popsat vektorem  $P$ , který sčítá dipóly ve směru pole v objemové jednotce  $V$  (2.4.2). [7]

$$P = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.4.2)$$

Pokud je elektrická polarizace v každém bodě stejná, lze ji vypočíst součinem vytvořených dipólů  $n$  s dipólovým momentem  $M$  (2.4.3). [7]

$$P = n * M = n * Q * d \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.4.3)$$

Dle chování vazebných sil nábojů můžeme polarizaci rozlišit na pružnou a nepružnou. Liší se ve velikosti posunu částic. U pružné polarizace je pohyb rychlý a nezávisí na teplotě, tlaku a dalších vnějších podmínkách. Nepružná polarizace je charakteristická velkými posuny a déle trvá, než se náboj ustálí. [2]

## 2.5 Elektrická pevnost

Každé dielektrikum má svoji hranici elektrické pevnosti  $E_p$ , která je definovaná průrazným napětím  $U_p$  s poměrem tloušťky látky  $d$  (2.5.1). V momentě, kdy na povrchu dielektrika vzroste napětí větší než je napětí průrazné, na povrchu se nashromáždí volné elektrické náboje. Tyto náboje se zrychlují a následně dojde u pevných látek k průrazu. U plynných a kapalných izolantů se tento jev nazývá přeskok, který je na rozdíl od průrazu dočasný. Následkem překročení elektrické pevnosti je nekontrolované zvýšení elektrické vodivosti. [2, 7]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad [\text{V/m}] \quad (2.5.1)$$

U kapalných izolantů je elektrická pevnost menší než u pevných látek, ale větší než u plynných látek. Je to způsobeno menšími volnými dráhami, které vedou k nárazové ionizaci. Tento jev má i negativní efekt, kdy se k molekulám rychleji zachytí nečistoty. Důsledkem je výrazné snížení elektrické pevnosti  $E_p$ . Rozpuštěné částice nemají degradační účinek jako koloidní částice, kterými jsou například kapičky vody nebo vzduchové bublinky. Tyto částice posléze vytváří vodivé cesty a rychleji dochází k elektrickému průrazu. [2, 7]

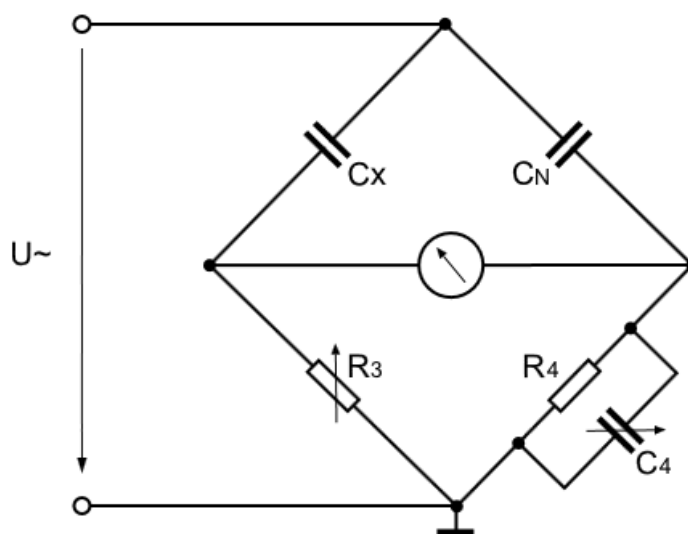
### 3 Metody měření relativní permitivity

#### 3.1 Můstkové metody

K měření elektrické kapacity se nejčastěji používají můstkové metody. Základním principem je přesné vyvážení můstku, jež zajišťuje vibrační galvanometr, který je velmi citlivý ke měření malých proudů. Sestavení můstkového zapojení se skládá z neznámého měřeného kondenzátoru  $C_x$ , vyvažovacích rezistorů a laditelných kondenzátorů. Je zásadní, aby můstek při měření byl napájen střídavým napětím, jelikož je kondenzátor frekvenčně závislá součástka.[8, 10]

##### 3.1.1 Metoda Scheringova můstku

Metoda Scheringova můstku se řadí do nejvíce používaných metod pro měření menších kapacit. Kromě měření relativní permitivity ho lze využít i pro měření ztrátového činitele  $tg \delta$  nebo pro měření dielektrických ztrát. Skládá se ze dvou částí. Do první části patří prvky, které jsou umístěny ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny. Druhá část slouží k vyvažování mimo zkušebnu a je stíněna proti vlivu elektromagnetického parazitního pole. Do galvanické části spadá vzorek a kapacitní normál určený pro příslušné měření. Vysokonapěťový kondenzátor o kapacitě 100 pF slouží jako kapacitní normál. Ztráty jsou zde zanedbatelné. Je důležité, aby použitý napěťový zdroj měl sinusový průběh a dostatečný výkon. Zapojení (obr. 3.1.1.1) obsahuje svodiče přepětí, které jsou určeny pro ochranu obsluhy, kdyby došlo k průrazu měřeného vzorku. [8, 10]



Obr. 3.1.1.1 Zapojení Scheringova můstku (převzato z: [8])

Pro vyrovnaný Scheringův můstek platí následující rovnice [8]:

$$C_s = C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad [\text{pF}] \quad (3.1.1.1)$$

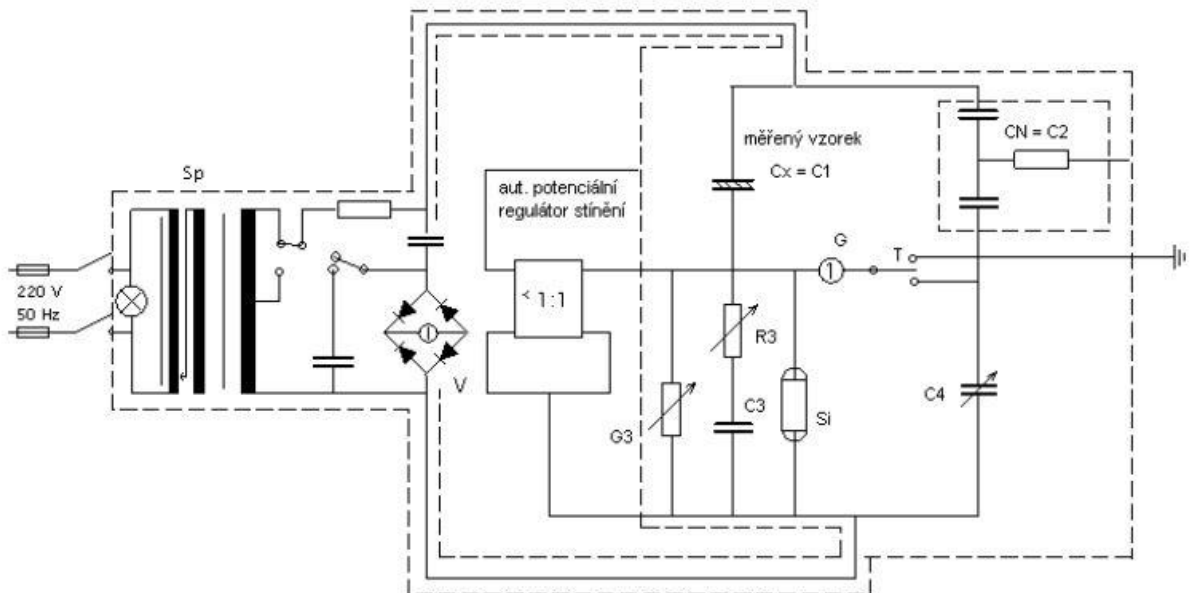
$$\text{tg} \delta = \omega * C_s * R_s = \omega * R_4 * C_4 \quad (3.1.1.2)$$

kde  $C_s$  a  $R_s$  jsou prvky náhradního obvodu dielektrika a pro  $R_4 = 1000/\pi$  a  $C_4$  v pF je:

$$\text{tg} \delta = 0,1 * C_4 \quad (3.1.1.3)$$

### 3.1.2 Metoda čtyřkapacitního můstku

Rozdíl mezi Scheringovo a čtyřkapacitním můstkem je v existenci kapacit ve všech větvích. Výsledkem toho je zvýšená impedance, která způsobuje větší citlivost i přesnost měření. Lze zde provádět měření s napětím do 2000 V, který které zaručuje zabudovaný napájecí zdroj. Tento zdroj je v rezonančním zapojení, kde na výstupu je sinusový tvar křivky o frekvenci 50 Hz. Zapojení lze vidět na obr. 3.1.2.1. [8]



Obr. 3.1.2.1: Čtyřkapacitní můstek (převzato z: [8])

Pro vyrovnaný můstek zde platí vztah [8]:

$$C_X = C_N * \frac{C_3}{C_4} = 100 * \pi * \frac{1}{\pi} * C_4 = 100 * C_4 \text{ [pF]} \quad (3.1.2.1)$$

### 3.2 Elektrodové systémy pro kapalné izolanty

Elektrodové systémy se skládají ze dvou nebo tří měrných elektrod. Velký důraz je kladen na snadné rozebírání systému, který se lehce důkladně čistí. Nutností je provést kalibraci měrného kondenzátoru pomocí kapaliny, u které zjistíme opravnou elektrickou kapacitu, která se následně odečítá pomocí následujících vztahů [8]:

$$C_c = \frac{C_n - C_0}{\varepsilon_n} \text{ [pF]} \quad (3.2.1)$$

kde  $C_c$  je kalibrační elektrická kapacita,

$C_0$  je elektrická kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu,

$C_n$  je elektrická kapacita elektrodové soustavy po naplnění kalibrační kapalinou,

$\varepsilon_n$  je relativní permitivita kalibrační kapaliny.

Opravnou elektrickou kapacitu  $C_g$  získáme rozdílem hodnot  $C_0$  a  $C_n$  a následně lze vypočítat hodnotu relativní permitivity  $\varepsilon_x$  neznámé kapaliny pomocí vzorce [8]:

$$\varepsilon_x = \frac{C_x - C_g}{C_c} \text{ [-]} \quad (3.2.2)$$

kde  $\varepsilon_x$  je relativní permitivita neznámé kapaliny,

$C_x$  je elektrická kapacita elektrodové soustavy po naplnění měřenou kapalinou,

$C_c$  je kalibrační elektrická kapacita,

$C_g$  je opravná elektrická kapacita.

### 3.3 Materiály elektrodových systémů

Materiál pro vytvoření elektrodového systému má mít několik důležitých vlastností. Jedním z nich je elektrická vodivost, jejíž rezistivita by se měla pohybovat mezi  $10^{-6} \div 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Důsledkem elektronové vodivosti, která je způsobena volnými elektrony, je vysoká elektrická a tepelná vodivost. Materiál se volí podle následného použití a podle cenové dostupnosti. Pro měření kapalných dielektrik je vhodně zvolit takový materiál, který s dotykem s tekutinou nekoroduje. Mezi nejčastěji volené materiály patří měď, hliník, zlato a stříbro. V tab. 3.3.1 jsou uvedeny vlastnosti jednotlivých kovů. [2]

Tab. 3.3.1: Vlastnosti vybraných vodičů [2]

materiál	teplota tavení [°C]	hustota [kg·m <sup>-3</sup> ]	rezistivita při 20 °C [μΩm]	součinitel tepelné vodivosti [W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
měď	1083	8,94	0,02	385
hliník	660,2	2,67	0,03	225
zlato	1063	19,32	0,02	297,3
stříbro	960,5	10,49	0,02	408

#### Mosaz

Mosaz je slitinou mědi a zinku, značí se Ms společně s číslem, který udává poměr mědi v kovu. Pro příklad označení Ms 70 znamená, že obsahuje 70 % mědi. Při obsahu zinku do 45 % vznikne maximální možná pevnost tahu, při vyšším obsahu již začne pevnost klesat. Mosazi s obsahem zinku 70 % a více jsou nejvíce chemicky stálé, tvárné s dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Slitiny mědi se vyrábí tvářené, zvláštní nebo slévárenské. V elektrotechnice se využívá pouze slitin tvářených. [2]

## 4 Formulace problému

Relativní permitivitu elektroizolační kapaliny lze určit několika způsoby. Velmi často používaný způsob je analytický výpočet pomocí vztahu

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad [-], \quad (4.1)$$

kde  $C_x$  je naměřená elektrická kapacita tekutiny a  $C_0$  je naměřená elektrická kapacita vzduchu. Obě elektrické kapacity musí být změřeny na identickém elektrodovém systému. [1, 2]

Další možnost, která se v dnešní době díky výpočetní technice nabízí, je numerický výpočet relativní permitivity na základě rozložení elektrického pole. Zde je však nutností znát matematický model problému.

### 4.1 Matematický model a algoritmus výpočtu

Výpočet relativní permitivity elektroizolační kapaliny lze realizovat následujícím postupem. Cílem níže uvedeného postupu je stanovit závislost elektrické kapacity elektrodového systému na relativní permitivitě vložené kapaliny. Z vytvořené závislosti lze pak zpětně na základě naměřené elektrické kapacity určit relativní permitivitu kapaliny.

V prvním kroku se stanoví rozložení elektrického potenciálu  $\varphi$  uvnitř uvažované oblasti pomocí Laplaceova operátoru dle rovnice [17]:

$$\Delta\varphi = 0 \quad (4.1.1)$$

Ke stanovení elektrického potenciálu je zapotřebí znát okrajové podmínky, tj. na jedné elektrodě je elektrický potenciál roven nule, na druhé elektrodě má elektrický potenciál hodnotu napětí přiloženého na elektrodový systém. [17]

Ze získaného rozložení elektrického potenciálu se vypočítá intenzita elektrického pole podle vztahu [17]:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi \quad [\text{V/m}] \quad (4.1.2)$$

Následně z intenzity elektrického pole se provede výpočet hustoty energie elektrického pole

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \quad [\text{J/m}^3], \quad (4.1.3)$$

kde  $\varepsilon$  je permitivita prostředí v bodě, ve kterém se právě určuje hustota energie elektrického pole. V případě elektroizolační kapaliny se hodnota relativní permitivity postupně dosazuje od jedné až do hodnoty, pro kterou ještě chceme vypočítat závislost elektrické kapacity elektrodového systému na relativní permitivitě vložené kapaliny.  $E$  je modul intenzity elektrického pole. [17]

Celkovou energii elektrického pole určíme na základě hustoty energie elektrického pole dle vztahu [17]:

$$W_e = \int_V w_e dV \quad [\text{J}] \quad (4.1.4)$$

Výslednou elektrickou kapacitu elektrodového systému lze stanovit pomocí rovnice

$$C = \frac{2 \cdot W_e}{U^2} \quad [\text{F}], \quad (4.1.5)$$

kde  $U$  je napětí, které je přiloženo na elektrodový systém. Hodnotu tohoto napětí si můžeme před začátkem celého postupu výpočtu zvolit, neboť výsledná elektrická kapacita vyjde vždy stejná. [18]

## 4.2 Numerický model

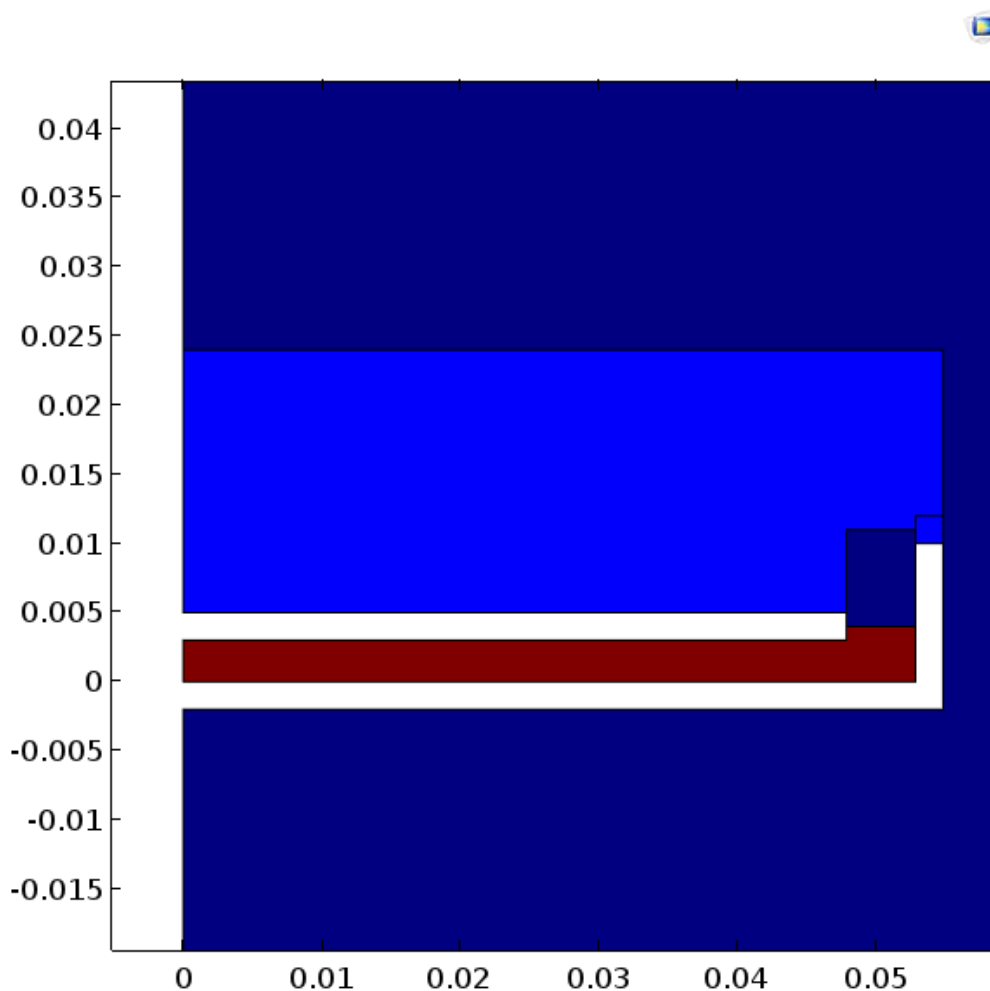
Pro realizaci výpočtu závislosti elektrické kapacity elektrodového systému na relativní permitivitě vložené kapaliny byl vytvořen numerický model. Vzhledem k předpokládanému tvaru navrhovaného zařízení byl numerický model sestaven jako rotačně symetrická 2D úloha. K numerickému výpočtu byl použit profesionální program COMSOL Multiphysics, který je založen na metodě konečných prvků.

Problém byl řešen jako parametrická analýza o dvou parametrech. Prvním parametrem byla měnící se vzdálenost elektrod ( $d = 1, 2, 3$  mm) a druhým parametrem byla měnící se relativní permitivita elektroizolační kapaliny ( $\varepsilon_r = 1, 2, \dots, 10$ ). Pro každou dvojici uvedených parametrů



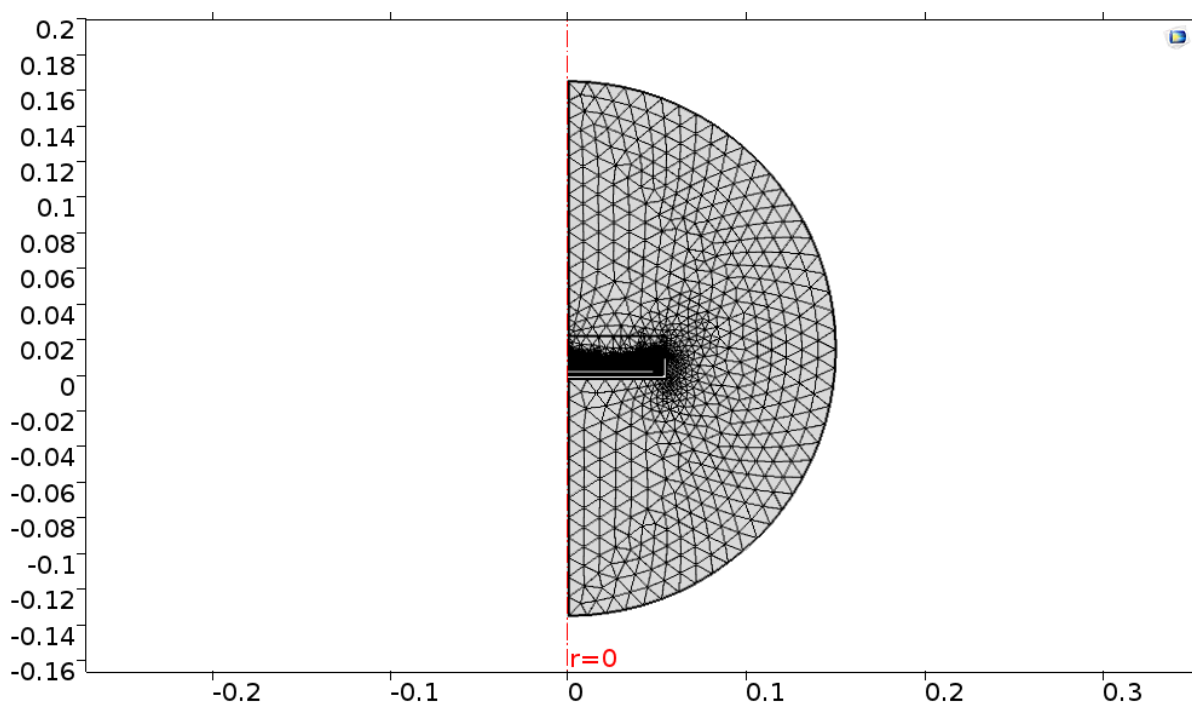
bylo numericky vypočteno elektrické pole, pomocí kterého byla stanovena výsledná hodnota elektrické kapacity elektrodového systému.

Zvolené rozměry navrhovaného zařízení včetně materiálového složení jsou podrobněji popsány v kapitole 5 Návrh zařízení. Na obrázku 4.2.1 je zobrazeno barevné rozlišení jednotlivých materiálů navrhovaného zařízení v programu COMSOL. Elektroizolační kapalina je zobrazena v bordové barvě. Bílá barva představuje elektrody. Uvnitř elektrod nebylo nutné počítat elektrické pole, proto nemají přiřazen materiál, a ani v nich nebyla generována síť pro numerický výpočet. Tmavě modrá barva je určena pro vzduch ( $\epsilon_r = 1$ ) a světlé modrá barva pro vrchní teflonovou část ( $\epsilon_r = 2,1$ ) a teflonový distanční kroužek. Distančním kroužkem se nastavuje vzdálenost elektrod.

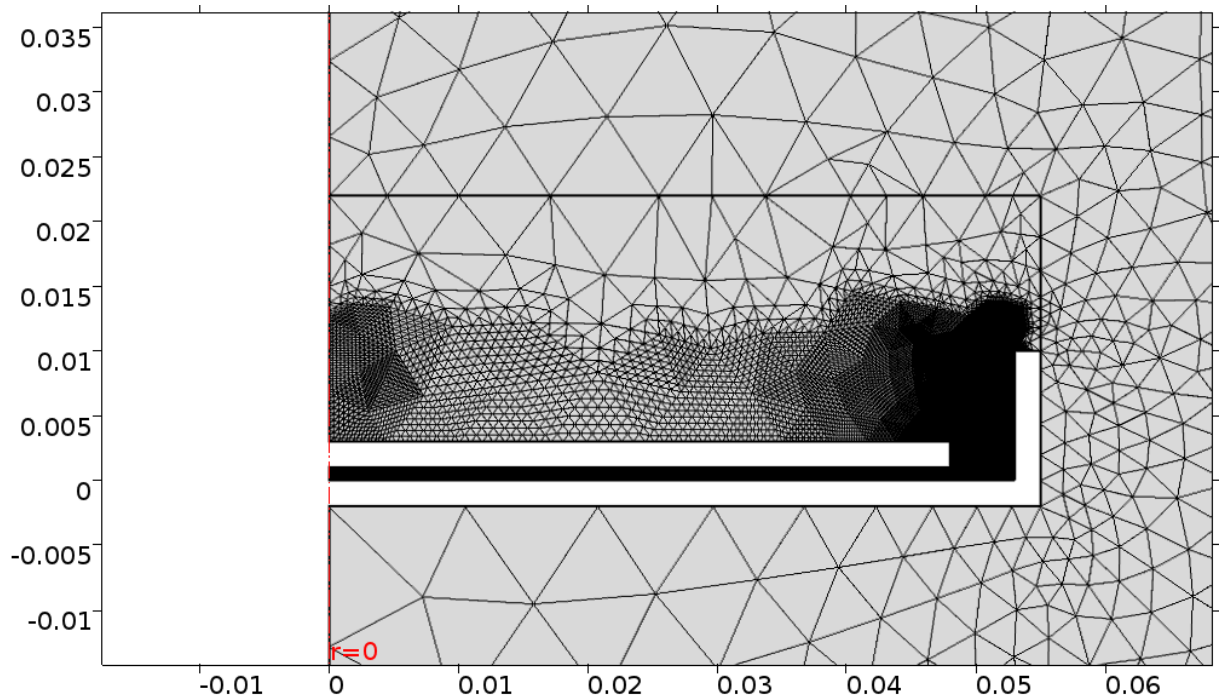


Obr. 4.2.1 Barevné rozlišení jednotlivých materiálů navrhovaného zařízení v programu COMSOL

Pro numerický výpočet byla zvolena hodnota napětí na elektrodách 10 V. Kvalita sítě byla zadána tak, aby vygenerovaná síť byla nejhustší především v oblasti mezi elektrodami, kde se nachází elektroizolační kapalina, a v nejbližším okolí. Na obrázku 4.2.2 je ukázka vygenerované sítě pro vzdálenost elektrod  $d = 1$  mm a na obrázku 4.2.3 je detail této sítě v místě elektrod. Vygenerovaná síť má celkem 20927 trojúhelníkových elementů a 42750 stupňů volnosti. Hranice řešené oblasti byla zvolena tak, aby byla v dostatečné vzdálenosti od elektrod a zároveň, aby počet elementů sítě nebyl zbytečně vysoký z důvodu kratší doby výpočtu. Celková doba výpočtu, ve které je zahrnuta kombinace obou výše uvedených parametrů, byla přibližně 1 minutu. Výpočet byl proveden na osobním počítači s procesorem AMD A10-7700K o frekvenci 3,5 GHz, operační paměti 16 GB a operačním systémem Windows 8 64-bit.



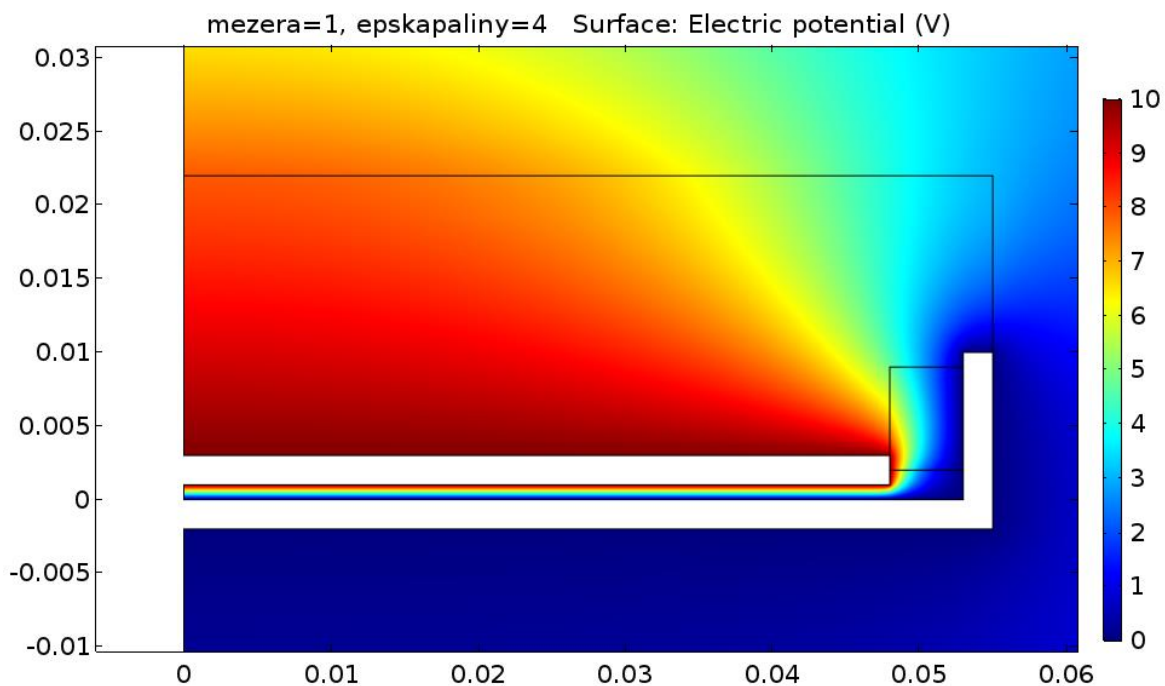
Obr. 4.2.2 Vygenerovaná síť pro vzdálenost elektrod 1 mm



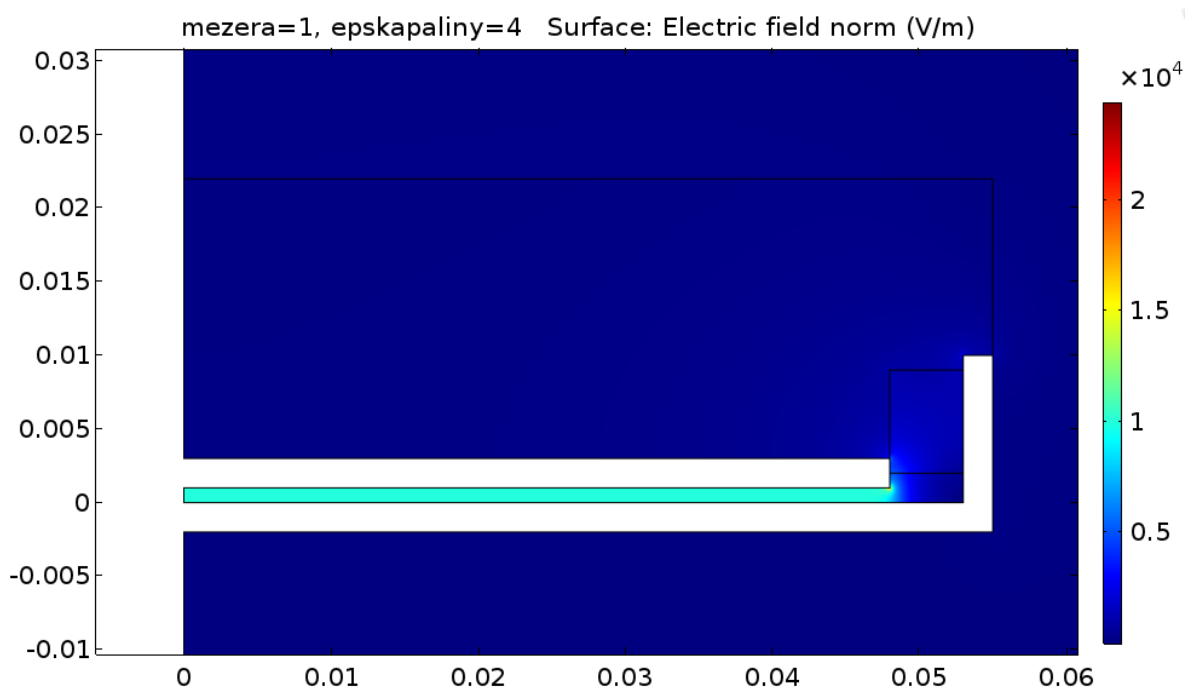
Obr. 4.2.3 Detail vygenerované sítě pro vzdálenost elektrod 1 mm

### 4.3 Výsledky numerického modelu

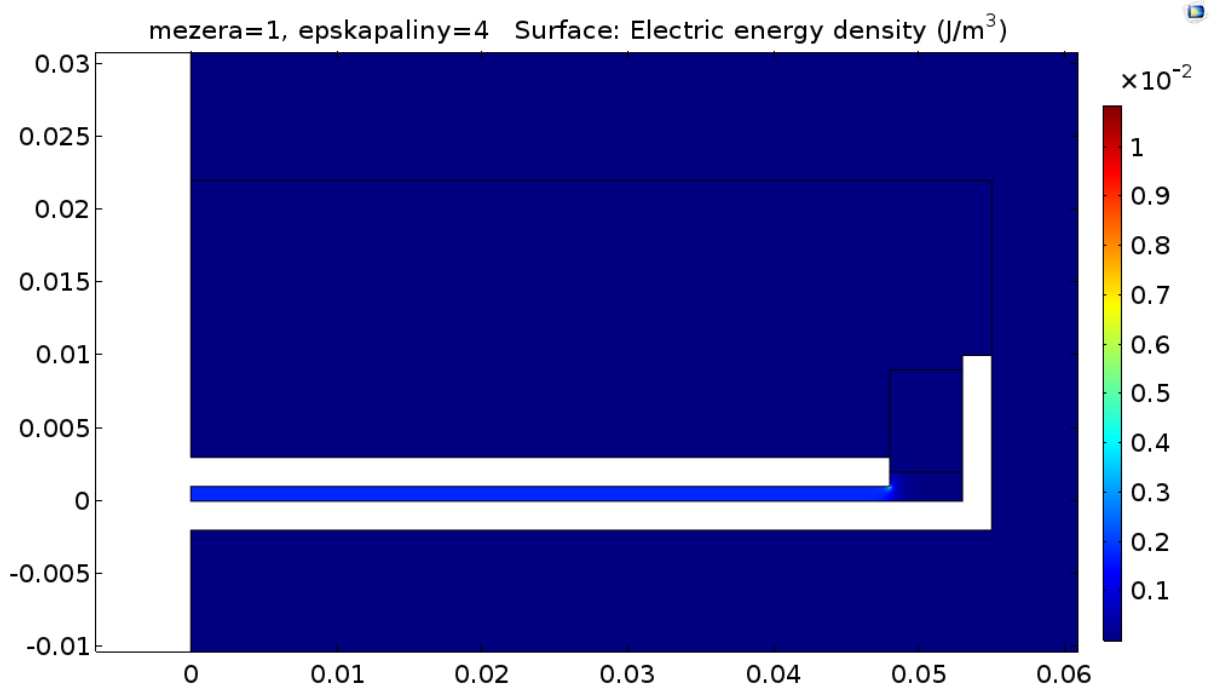
Pro ukázkou výsledků numerického modelu byly vybrány obrázky, které jsou platné pro tyto parametry: vzdálenost elektrod  $d = 1$  mm; relativní permitivita elektroizolační kapaliny  $\epsilon_r = 4$ . Na obrázku 4.3.1 lze vidět rozložení elektrického potenciálu. Velikost elektrického potenciálu na horní elektrodě dokazuje, že hodnota napětí přiloženého na elektrodách je 10 V. Rozložení intenzity elektrického pole lze nalézt na obr. 4.3.2. Z obrázku je patrné, že hodnota intenzity elektrického pole v části mezi elektrodami je přibližně 10 kV/m. Zobrazení hustoty energie elektrického pole dokládá obr. 4.3.3.



Obr. 4.3.1 Rozložení elektrického potenciálu

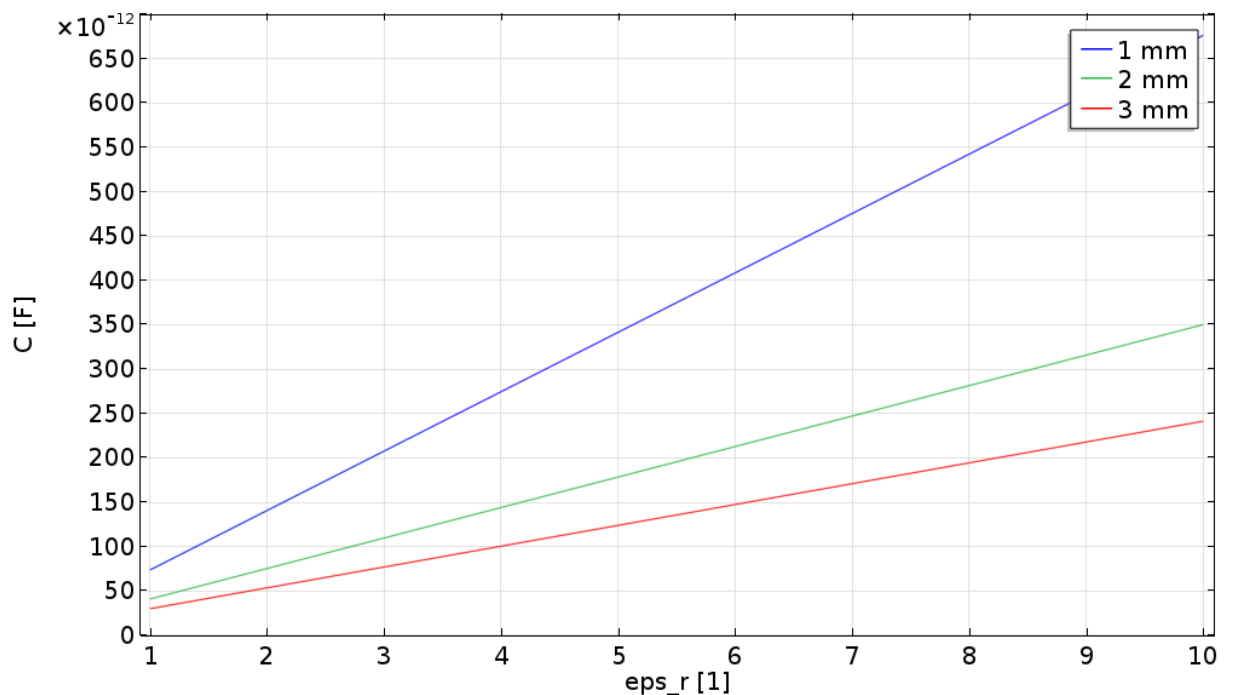


Obr. 4.3.2 Rozložení intenzity elektrického pole



Obr. 4.3.3 Rozložení hustoty energie elektrického pole

Jak již bylo uvedeno, cílem numerického výpočtu bylo stanovení závislosti elektrické kapacity elektrodového systému na relativní permitivitě vložené kapaliny. Tuto závislost zobrazuje obrázek 4.3.4 pro různé vzdálenosti elektrod, které byly brány v úvahu.



Obr. 4.3.4 Závislost elektrické kapacity elektrodového systému na relativní permitivitě vložené kapaliny a vzdálenosti elektrod

Z grafické závislosti na obr. 4.3.4 se na základě naměřené elektrické kapacity a vzdálenosti elektrod odečte hodnota relativní permitivity kapaliny. Tímto způsobem se však nedají odečítat hodnoty přesně, proto byl navíc vytvořen pomocný program v prostředí MATLAB, do kterého byly zadány charakteristiky vypočtené v COMSOLu. Vytvořený program je uveden v příloze č. 17. Po spuštění programu se počítač nejprve zeptá na změřenou elektrickou kapacitu, poté vypíše hodnotu relativní permitivity kapaliny pro všechny vzdálenosti elektrod, tj. pro 1, 2 a 3 mm.

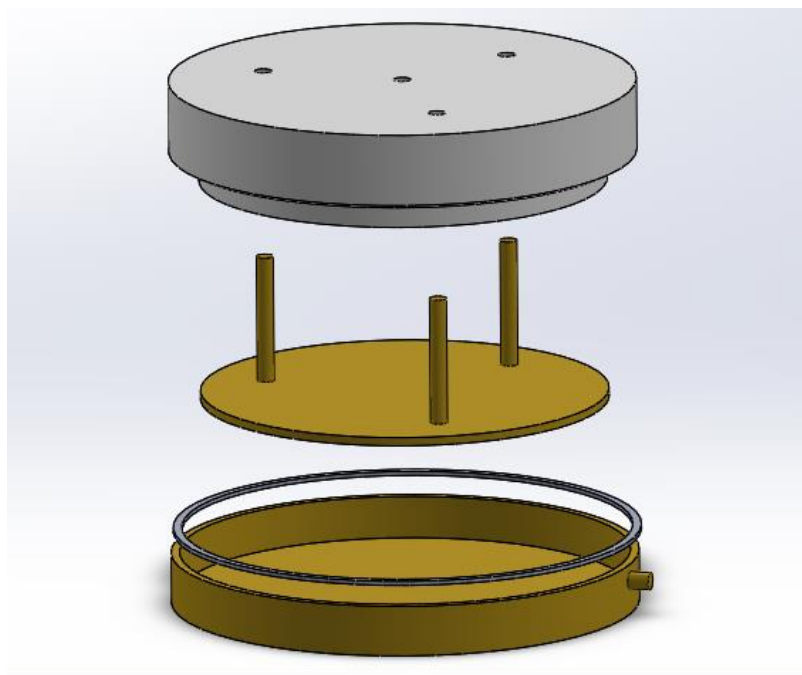
## 5 Návrh zařízení

Další část této práce se zabývá návrhem zařízení na měření permitivity tekutin, jeho konstrukcí a následným testováním. Kapitola obsahuje popis hlavních částí navrženého zařízení včetně rozměrů, postup výroby s kompletním finančním plánem, zpracování a výpočet příslušných hodnot. V závěru kapitoly je porovnání hodnot s profesionálním přístrojem a celkové zhodnocení vyrobeného zařízení na měření permitivity tekutin.

Při návrhu zařízení byl hlavní cíl cenová dostupnost a možnost využít zařízení na odborném pracovišti, které má k dispozici RLC měřič a topnou plotýnku. Dále bylo důležité vzít v potaz jednoduchost konstrukce, která by byla snadno vyrobitelná. Dalším faktorem bylo zvolit cenově dostupný materiál pro elektrody, jehož vlastnosti budou odpovídat požadavkům k měření kapacity tekutin. K tomuto účelu byla zvolena mosaz. Zařízení musí být také lehce rozebíratelné k potřebnému čištění.

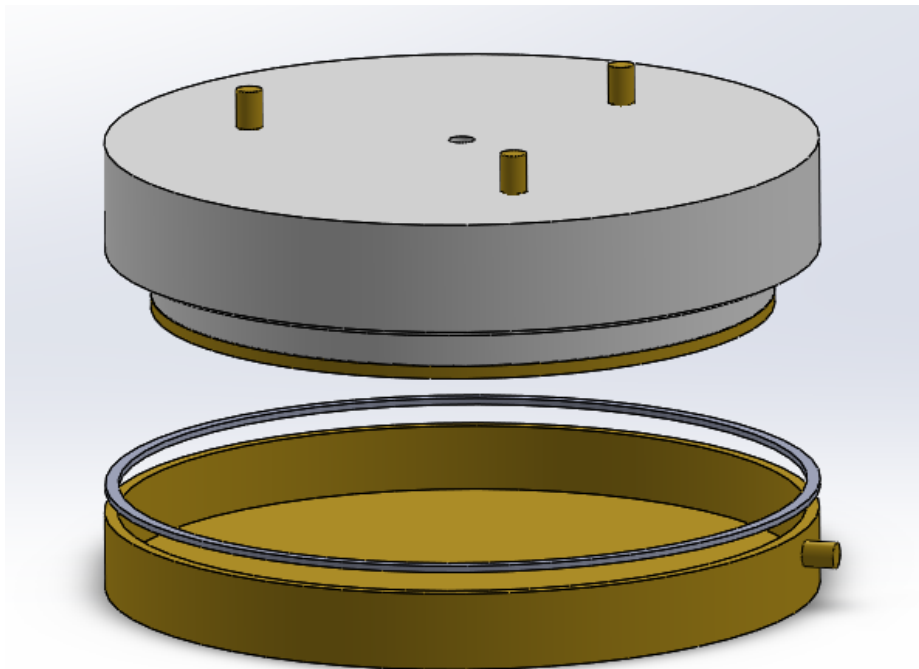
### 5.1 Hlavní části zařízení a rozměry

Navržené zařízení je založeno na principu elektrodového systému. Na obrázku 5.1.1 jsou zobrazeny čtyři hlavní části navrženého zařízení (popis shora dolů): vrchní teflonová část, horní mosazná elektroda, distanční kroužek a spodní mosazná elektroda, která slouží zároveň jako nádoba pro měřenou tekutinu.



Obr. 5.1.1 Jednotlivé části navrženého zařízení

K horní elektrodě je pomocí tří navařených mosazných šroubů připevněna vrchní teflonová část (viz obr. 5.1.2). Protože relativní permitivita tekutin je závislá na teplotě a frekvenci, je v návrhu zařízení počítáno i s ohřevem tekutiny. Z tohoto důvodu je uprostřed vrchní teflonové části otvor pro sondu teploměru, která se dotýká horní elektrody.

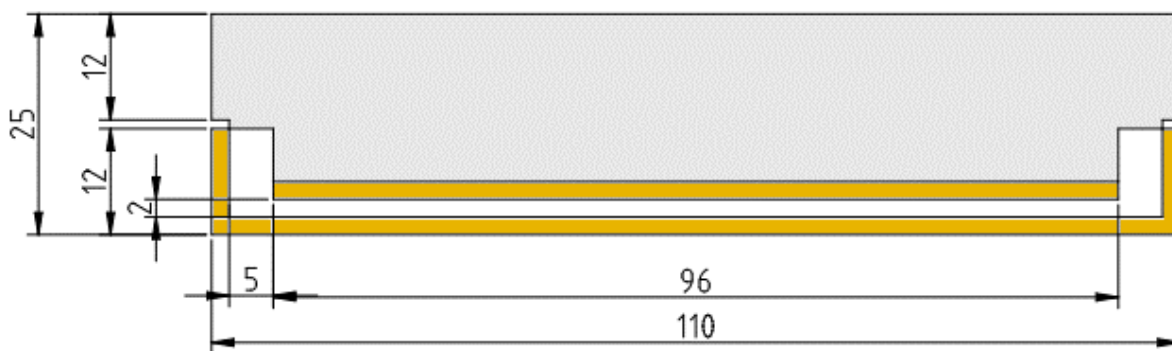


Obr. 5.1.2 Způsob připevnění horní elektrody

Na jednom ze tří uchycovacích šroubů je připojen konektor. Druhý konektor je na boku spodní elektrody. Distanční kroužek o výšce 1 mm slouží k dodržení 2 mm vzdálenosti elektrod pro měřenou kapalinu o objemu 15 ml. Pro měření ve vzdálenosti elektrod 3 mm byl vyroben ještě kroužek s výškou 2 mm. Bez distančního kroužku lze měřit při milimetrové vzdálenosti elektrod.

Na obr. 5.1.3 je zobrazen řez navrženým zařízením, kde jsou vykresleny jednotlivé rozměry. Tloušťka obou elektrod je 2 mm. Výška hrany spodní elektrody je 12 mm stejně jako výška vrchní teflonové části, která má vnější průměr 110 mm a vnitřní průměr 96 mm rovněž jako horní elektroda. Prostor mezi spodní elektrodou a horní teflonovou částí je o velikosti 1 mm a je určen pro distanční kroužek.





Obr. 5.1.3 Rozměry navrženého zařízení

## 5.2 Způsoby ohřevu

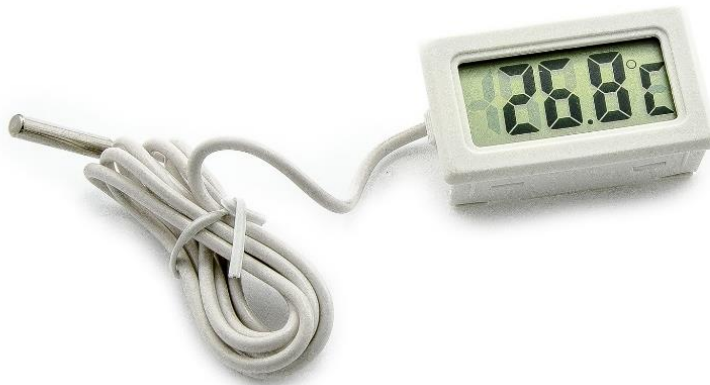
Jak už bylo uvedeno, v návrhu zařízení je počítáno i s ohřevem tekutiny z důvodu teplotní závislosti permitivity. Nejjednodušší způsob je pomocí topné plotýnky, která je k dispozici na každém odborném pracovišti. Velkou výhodou je vybavenost topného zařízení regulátorem. Důležité je spodní elektrodu ohřívat pomalu a rovnoměrně, aby nedošlo k velkým výkyvům v teplotách mezi horní a spodní elektrodou.

K experimentu byl použit elektrický vaříč ECG EV 1510 White (obr. 5.2.1), který je vybaven regulátorem teploty a ochranou proti přehřátí [9].



Obr. 5.2.1 Elektrický vaříč ECG EV 1510 White [9]

Ke kontrole teploty byl použit digitální teploměr s LCD displejem (obr. 5.2.2), který má rozsah teplot od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pomocí sondy lze kontrolovat teplotu na povrchu horní elektrody.



Obr. 5.2.2 Bílý LCD teploměr [12]

Dalším způsobem je pomocí topné fólie, která je přiložena na spodní straně nádoby. Ukázku použité fólie lze vidět na obr. 5.2.3. Fólie o průměru 174 mm je napájena pomocí napěťového zdroje. Jak už bylo zmíněno, teplota se kontroluje pomocí teploměru, který je v úzkém otvoru v přímém kontaktu s horní elektrodou. Maximální hodnota napětí pro napájení fólie je výrobcem stanovena na 12 V a maximální provozní teplota  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při následném experimentu bylo zjištěno, že ohřev trvá velmi dlouho, proto použití topné fólie je spíše nepraktické.



Obr. 5.2.3 Topná fólie [6]

### 5.3 Finanční plán

Do finančního rozpočtu byly započítány materiálové položky určené na výrobu zařízení a cena za práci zaměstnanců. Jeden zaměstnanec vyráběl mosazné elektrody, druhý teflonovou horní část a další detaily potřebné k dokončení finálního zařízení. Celkově cena za materiály činí 1538 Kč. V tab. 5.3.1 lze vidět rozepsané položky s jednotlivými cenami.

Tab. 5.3.1 Výrobní náklady

Název	Cena	Množství	Cena celkem
Mosazná elektroda	500,00 Kč	2	1000,00 Kč
Teflon	282,00 Kč	1	282,00 Kč
Kruhová mosazná tyč	89,00 Kč	1	89,00 Kč
Mosazná matice	1,23 Kč	3	3,69 Kč
LCD teploměr	125,00 Kč	1	125,00 Kč
Alkalická baterie 1,5 V	9,00 Kč	2	18,00 Kč
Kabelová zdírka 4 mm	10,00 Kč	2	20,00 Kč
Práce zaměstnanců	150,00 Kč/hod	6 h	900,00 Kč
			<b>2 437,69 Kč</b>

### 5.4 Postup výroby

První vyrobené části zařízení byly mosazné elektrody. Vyráběli je pracovníci dílny ZČU v Plzni na soustruhu z mosazné kulatiny o průměru 110 mm. Do soustruhu se vsadí kulatina a pracovník pomocí přístroje začne obrábět zařízení do potřebných rozměrů. Výhodou soustruhu je velmi dobrá přesnost.

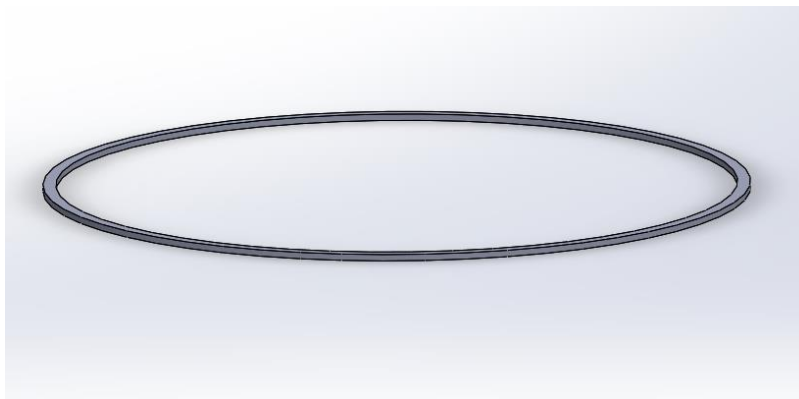
Teflonové části byly vyráběny obdobným způsobem jako mosazné elektrody, také na soustruhu. Otvory určené pro šrouby a teploměr se vyhotovily pomocí vrtáků s průměrem 4 mm. Šrouby jsou vytvořeny z mosazné kruhové tyčky, do které byly vyryty závit, a vznikla tím závitová tyč. Tyč byla rozřezána na menší tyčky, jež se pomocí autogenu připevnily na horní elektrodu. Vrchní teflonová část se nasunula na šrouby horní elektrody a pomocí tří mosazných matic drží tyto dvě části u sebe.

Původně byla vrchní část nejdříve vyrobena pomocí 3D tiskárny, ale při prvním testování bohužel materiál ABS (akrylonitrilbutadienstyren) neobstál a začal se vlivem zvyšování teploty deformovat. Jednotlivé části zařízení s původním vrchním dílem lze vidět na obrázku 5.4.1.



Obr. 5.4.1 Jednotlivé části zařízení s původním vrchním dílem

Distanční kroužky mohou být vyrobeny na 3D tiskárně. K jejich provedení je zapotřebí navrhnout 3D model v jakémkoliv programu, který podporuje formát určený pro 3D tisk. Katedra teoretické elektrotechniky umožňuje tisk na tiskárně značky Prusa i3 MK2. Pro menší velikosti je vhodnější produkty vyrábět tímto způsobem pro přesnější rozměry. Ukázkou distančního kroužku možno vidět na obr. 5.4.2.



Obr. 5.4.2 Distanční kroužek 1 mm

Finální zařízení obstálo u všech měření kapalin i při zvyšování teploty. Sestavené finální zařízení včetně nainstalovaných konektorů lze vidět na obr. 5.4.3.



Obr. 5.4.3 Finální zařízení

## 5.5 Výhody a nevýhody zařízení

Mezi výhody vyrobeného zařízení patří cenová dostupnost, jednoduchost konstrukce, která se snadno rozebírá a čistí. Zařízení lze využít v jakékoliv laboratoři, která má k dispozici RLC měřič a topné zařízení s regulátorem.

Mezi nevýhody radíme menší přesnost v porovnání s profesionálním zařízením. I přes jednoduchost konstrukce je složitý proces čištění při měření kapalin. Je zde důležité důkladné očištění dle normy ČSN EN 60247, které má několik úkonů [19]:

1. Omytí horkou vodou s účinným prostředkem na nádobí.
2. Důkladné vymytí čistým technickým lihem.
3. Odstání v destilované vodě alespoň na 30 min.
4. Vložení do trouby na 60 - 120 min o teplotě 105 - 110 °C.



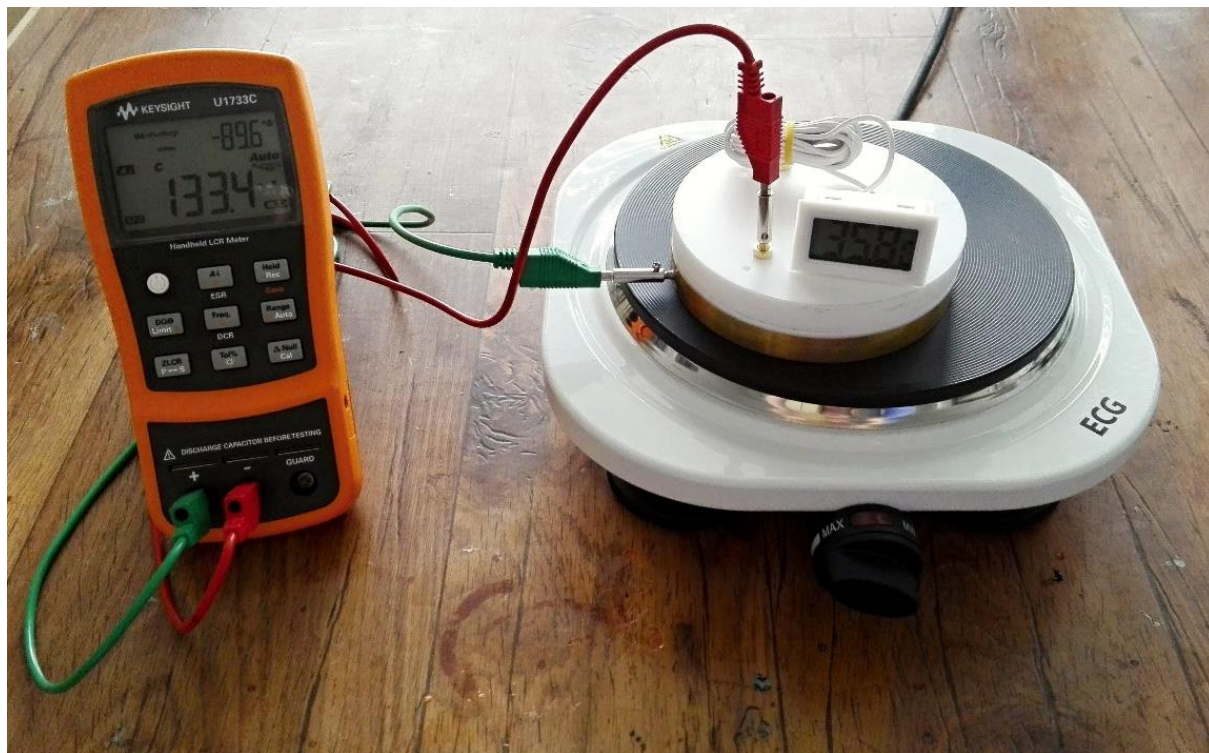
## 6 Experiment

Pro ověření funkčnosti vyrobeného zařízení byl proveden experiment, ve kterém byly použity minerální, syntetické a rostlinné oleje. Relativní permitivita kapaliny byla zjišťována v závislosti na frekvenci a teplotě. Frekvence se měnila pomocí RLC měřiče a teplota pomocí topné plotýnky. Měření bylo provedeno pro vzdálenosti elektrod 1, 2 a 3 mm.

### 6.1 Měřicí pracoviště

Měření bylo provedeno v laboratoři EK615 na Fakultě elektrotechnické v Plzni. K dispozici mi byl poskytnut RLC měřič Keysight U1733C společně s kabely a topnou plotýnkou. Zapojení zařízení lze vidět na obrázku 6.1.1. K zařízení je přidělen speciální teploměr se sondou, která je uvnitř vrchního plastového dílu a dotýká se horní elektrody.

Před měřením se příslušný olej aplikoval do zařízení pomocí plastové laboratorní stříkačky. Každý olej měl přidělenou vlastní stříkačku, aby nedošlo k promísení tekutin a tím ke znehodnocení naměřených hodnot.



Obr. 6.1.1 Měřicí pracoviště

Měření probíhalo pro různé oleje ve třech vzdálenostech elektrod. Ke změně vzdálenosti byly použity distanční kroužky. Pro 1 mm se distanční kroužek nepoužil, pro vzdálenost 2 mm byl použit 1 mm distanční kroužek a ke vzdálenosti 3 mm se nainstaloval 2 mm distanční kroužek. Zařízení bylo potřeba nechat vychladnout před dalším měřením a provést výměnu testovaného oleje, který se mohl vlivem teploty znehodnotit, a výsledky z dalších měření by mohly být nepřesné.

## 6.2 Zpracování naměřených hodnot

Analytický způsob výpočtu relativní permitivity tekutiny byl proveden podle vztahu

$$\varepsilon_r = \frac{C_x - C_p}{C_0 - C_p} [-], \quad (6.2.1)$$

kde  $C_x$  je naměřená elektrická kapacita tekutiny,  $C_0$  je naměřená elektrická kapacita vzduchu a  $C_p$  je naměřená elektrická kapacita přívodů.

Aby byly hodnoty správné, musela se vzít v potaz velikost kapacity přívodů a následně provést odečet od naměřené elektrické kapacity tekutiny i od naměřené elektrické kapacity vzduchu. Elektrická kapacita přívodů byla změřena o hodnotě 15 pF. Měření a výpočet byl proveden pro dané vzdálenosti elektrod, frekvence a zvyšující se teplotu. Uvedené frekvence byly přímo nastaveny v RLC měřiči.

Pomocí naměřené kapacity vzduchu (tab. 6.2.1) se vypočítala relativní permitivita vzduchu, podle které se následně určila přesnost měření z předpokladu, že relativní permitivita vzduchu je rovna jedné.

Tab. 6.2.1: Naměřená elektrická kapacita vzduchu

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
d [mm]	1	69,1	69,3	70,15	69,53	69,94
	2	32,8	32,9	33,5	33,36	33,51
	3	21,3	21,5	21,94	21,59	21,64

Téměř shodné hodnoty můžeme vidět v tab. 6.2.2. Měření bylo vykonáno při pokojové teplotě a relativní permitivita byla vypočtena dle vzorce

$$\varepsilon_r = \frac{C_0 - C_p}{\varepsilon_0} * \frac{d}{S} \quad [-] \quad (6.2.2)$$

kde  $d$  je vzdálenost elektrod,  $S$  je plocha elektrody,  $C_0$  je naměřená elektrická kapacita vzduchu,  $C_p$  je naměřená elektrická kapacita přívodů.

Tab. 6.2.2: Relativní permitivita vzduchu

$\varepsilon_r$ [1]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$d$ [mm]	1	1,08	1,08	1,10	1,09	1,09
	2	1,02	1,03	1,05	1,04	1,05
	3	1,00	1,01	1,03	1,01	1,01



## 7 Výsledky měření permitivity vybraných olejů

Za účelem měření permitivity tekutin byly vybrány tyto oleje: minerální olej Shell Diala DX, minerální olej Paramo Trafo N, syntetický olej Midel 7131 a slunečnicový olej.

### 7.1 Shell Diala DX

Minerální olej Shell Diala DX má velmi dobré dielektrické vlastnosti, vysokou oxidační stabilitu a velmi nízkou teplotní odolnost. Kombinace speciálně vylepšených naftenových nástřiků s osvědčeným antioxidantem nabízí prodlouženou životnost produktu. Používá se jako elektroizolační olej pro transformátory, rozvaděče a olejově chlazené usměrňovače. [11]

Tabulka (P. 2.1) ukazuje vypočítanou relativní permitivitu minerálního oleje Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 1 mm. Na obr. P. 3. 1 je znázorněna závislost relativní permitivity na teplotě, která ukazuje stoupání relativní permitivity se zvyšující se teplotou, ale při 60 °C lze vidět mírné klesání. Výpočet byl proveden pomocí vzorce 6.2.1.

Měření pro vzdálenost elektrod 2 mm dokazuje, že se stoupající teplotou stoupá relativní permitivita a se zvyšující frekvencí klesá. Dle normy, je tato vzdálenost nejvhodnější a dokazuje to grafické znázornění na obr. P. 3. 2 a obr. P. 4. 2.

Stejně jako při měření vzdálenosti 1 mm, tak při vzdálenosti 3 mm došlo k výrazné změně při teplotě 60 °C, ale tentokrát došlo k výraznějšímu stoupání. Závislost relativní permitivity na frekvenci má stejnou charakteristiku jako v předchozích případech.

Pro ověření vypočítaných hodnot relativní permitivity bylo provedeno srovnání s hodnotami, které uvádí výrobce. Tyto informace byly poskytnuty od doc. Ing. Pavla Trnky, Ph.D. Hodnota relativní permitivity uváděná výrobcem je 2,2. Bohužel výrobce však neuvádí, pro kterou teplotu tato hodnota je.

V tab. 7.1.1 lze vidět srovnání relativní permitivity vypočtené analyticky s výsledky získané pomocí numerického modelu pro vzdálenost elektrod 2 mm, frekvenci 100 Hz a při elektrické kapacitě vzduchu v zařízení 32,8 pF.

Tab. 7.1.1 Porovnání analytických a numerických výsledků (Shell Diala DX,  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$ )

$t \text{ [}^\circ\text{C]}$	$C \text{ [pF]}$	$\epsilon_r \text{ [-]}$ analyticky	$\epsilon_r \text{ [-]}$ numericky
22,5	62,8	1,91	2,07
40	64,5	1,97	2,12
50	69,7	2,13	2,27
60	74,9	2,28	2,42
70	76,1	2,32	2,46
80	78	2,38	2,51
90	79,5	2,42	2,56

## 7.2 Paramo Trafo N

Olej Paramo Trafo N je používán hlavně jako izolační a chladicí kapalina do transformátorů různých napěťových hladin. Je vyroben z hluboce rafinovaného základového oleje z naftenické ropy. Tento minerální olej je neinhibovaný a má velmi dobrou oxidační stabilitu. Lze ho použít ve strojích s nejvyšším napětím a výkonem, či do spínačů, stykačů a kondenzátorů. [15]

V příloze P. 7 lze vidět závislost relativní permitivity na teplotě. Při všech vzdálenostech elektrod relativní permitivita se stoupající teplotou rostla. V případě vzdálenosti 1 mm při frekvenci 1 kHz a výše relativní permitivita při teplotě o 70 °C začala klesat.

Závislost relativní permitivity na frekvenci je znázorněna v příloze P. 8. a nejsou zde vidět nápadné změny. Charakteristiky jsou téměř lineární a klesají se stoupající teplotou.

Informace o relativní permitivitě uváděné výrobcem se bohužel v tomto případě nepodařilo zjistit.

V tab. 7.2.1 je možné vidět srovnání dvou způsobů výpočtu. Hodnoty jsou měřeny pro vzdálenost elektrod 2 mm a frekvenci 100 Hz. Kapacita zařízení se vzduchem je 32,8 pF.

Tab. 7.2.1 Porovnání analytických a numerických výsledků (Paramo Trafo N,  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$ )

$t \text{ [}^\circ\text{C]}$	$C \text{ [pF]}$	$\epsilon_r \text{ [-]}$ analyticky	$\epsilon_r \text{ [-]}$ numericky
22,5	92,3	2,81	2,93
40	96,5	2,94	3,05
50	100	3,05	3,15
60	98,2	2,99	3,1
70	99,8	3,04	3,15
80	100,5	3,06	3,17
90	102,6	3,13	3,23

### 7.3 Midel 7131

Syntetický olej Midel 7131 je transformátorová tekutina na bázi syntetického esteru, která je flexibilní, spolehlivá a se snahou prodloužení životnosti zařízení. Je speciálně vyvinut tak, aby poskytoval bezpečnou alternativu k tradičním kapalným i suchým transformátorům. Nabízí vysoký teplotní výkon, zvýšenou požární bezpečnost a vynikající odolnost proti vlhkosti. Výrobce má snahu o větší ochranu životního prostředí. Olej byl testován v nezávislých laboratořích a bylo zjištěno, že je nekorozivní. [16]

Měřením bylo dokázáno, že závislost relativní permitivity na teplotě se nejlépe vykazuje při vzdálenosti elektrod 2 mm, kdy hodnoty postupně narůstaly se zvyšující se teplotou. Při vzdálenosti elektrod 1 mm, relativní permitivita stoupala do teploty 70 °C a následně došlo k mírnému klesání. Obdobně došlo ke klesání pro vzdálenost 3 mm, ale již při teplotě 60 °C. Grafické znázornění lze vidět v příloze P. 11.

Závislost na frekvenci zde má jako u předchozích olejů mírně klesající charakter, ale pro vzdálenost elektrod 3 mm je hodnota relativní permitivity nejvyšší. Grafické znázornění lze vidět v příloze P. 12.

Správnost měření byla potvrzena hodnotou relativní permitivity, kterou udává výrobce a rovná se 3,8. I v tomto případě výrobce neuvádí, pro kterou teplotu tato relativní permitivita je. Hodnota výrobce byla opět poskytnuta doc. Ing. Pavlem Trnkou, Ph.D.

Tab. 7.3.1. ukazuje porovnání analytických a numerických výsledků pro syntetický olej Midel 7131. Hodnoty byly měřeny se vzdáleností elektrod 2 mm a frekvenci 100 Hz.

Tab. 7.3.1 Porovnání analytických a numerických výsledků (Midel 7131,  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$ )

$t$ [°C]	$C$ [pF]	$\epsilon_r$ [-] analyticky	$\epsilon_r$ [-] numericky
25,9	115,1	3,51	3,59
40	119,6	3,65	3,72
50	118,7	3,62	3,7
60	120,5	3,67	3,75
70	121,8	3,71	3,79
80	122	3,72	3,79
90	121,9	3,72	3,79

## 7.4 Slunečnicový olej

Slunečnicový olej se v elektrotechnice spíše nepoužívá, jeho využití je hlavně v potravinářském průmyslu. Do práce byl zařazen pro srovnání relativní permitivity s minerálními a syntetickými oleji, které se běžněji používají v elektrotechnice.

Měření dokázalo, že kromě minerálního oleje Shell Diala DX byla naměřená kapacita nižší než u ostatních olejů. Tabulku s naměřenými hodnotami lze vidět v příloze P. 13. Z grafů v příloze P. 15 lze vidět, že při vzdálenosti elektrod 1 mm, relativní permitivita vlivem teploty lehce kolísala, ale při větších vzdálenostech elektrod byla relativní permitivita téměř lineární. V příloze P. 16 lze vyzorovat, že v závislosti na frekvenci relativní permitivita lineárně mírně klesala.

Pro tento druh rostlinného oleje není potřeba uvádět hodnotu relativní permitivity, výrobce ji neudává.

Porovnání výsledku experimentu pomocí analytického a numerického výpočtu lze vidět v tab. 7.4.1. Hodnoty jsou měřeny pro vzdálenost 2 mm mezi elektrodami a frekvenci 100 Hz.

Tab. 7.4.1 Porovnání analytických a numerických výsledků (slunečnicový olej,  $d = 2 \text{ mm}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$ )

$t$ [°C]	$C$ [pF]	$\epsilon_r$ [-] analyticky	$\epsilon_r$ [-] numericky
25,9	93,9	2,86	2,98
40	106,4	3,24	3,34
50	108,8	3,32	3,41
60	107,7	3,28	3,38
70	105,8	3,23	3,32
80	107,4	3,27	3,37
90	107,7	3,28	3,38

## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit zařízení na měření permitivity tekutin, které bude plnit stejný účel jako profesionální přístroje používané v technické praxi, avšak bude cenově dostupnější. Při návrhu zařízení na měření permitivity tekutin byla prioritou nejen cenová dostupnost, ale i jednoduchost a možnost připojení doplňkových zařízení, která jsou k dispozici na každém odborném pracovišti. Zařízení bylo potřeba navrhnout tak, aby se dalo snadno rozebrat a vyčistit.

Finální navržené zařízení má tvar válce a skládá se ze čtyř hlavních částí: horní a spodní mosazné elektrody, distančního kroužku a vrchní teflonové části. K horní elektrodě je pomocí navařených mosazných šroubů připevněna vrchní teflonová část. Uprostřed vrchní teflonové části je otvor pro sondu teploměru, která se dotýká horní elektrody. Na jednom ze tří uchycovacích šroubů je připojen konektor. Spodní elektrodu tvoří nízká nádobka, na jejímž boku je druhý konektor. Distanční kroužek slouží ke změně vzdálenosti elektrod.

Ověření funkčnosti vyrobeného zařízení probíhalo v laboratoři, která měla k dispozici RLC měřič a topnou plotýnku s regulací. Pro experiment byly použity minerální, syntetické a rostlinné oleje. U každého oleje byla měřena elektrická kapacita pro 3 vzdálenosti elektrod (1, 2 a 3 mm). Frekvence byla nastavována pomocí RLC měřiče a teplota pomocí topné plotýnky. Následně se pomocí analytických vzorců určila relativní permitivita jednotlivých kapalin. Pro další způsob výpočtu relativní permitivity byl vytvořen numerický model v programu COMSOL Multiphysics, díky kterému se mohly výsledky porovnat. Rozdíl výsledků se lišil pouze o desetiny hodnoty. Výsledky dokázaly, že při vzdálenosti elektrod 2 mm je nejpřesnější charakteristika.

Všechny výše uvedené cíle byly splněny a zároveň byla experimentálně ověřena funkčnost vyrobeného zařízení. Cena zařízení včetně vykonané práce vyšla na 2 438 Kč. Zařízení je lehce rozebíratelné a neobsahuje místa, která se obtížněji čistí.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] DUBSKÝ, Jan. *Elektrotechnické materiály*. II. doplněné. Plzeň: VŠSE v Plzni, 1972.
- [4] BEATY, H. Wayne. *Electrical engineering materials reference guide*. New York: McGraw-Hill, c1990. ISBN 0070041962.
- [5] HASSDENTEUFEL, Josef. *Elektrotechnické materiály: základní spis České matice technické*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [6] Topná folie [online] [Cit. 10.12.2016]. Dostupné z: <http://www.malapa.cz/produkty/topne-folie-a-pasy/TF05/>
- [7] LIPTÁK, Jan. a Josef. SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03191-9.
- [8] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [9] Elektrický vaříč [online] [Cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <https://www.expert.cz/ecg-ev-1510-white/>
- [10] MIŠKAŘÍK, M. *Měření velmi malých kapacit a indukčností*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce: Ing. Milan Navrátil, Ph.D.
- [11] Shell Diala DX [online] [Cit. 2.5.2017]. Dostupné z: <http://www.dayanoilco.com/upload/product/1451466626.pdf>
- [12] Digitální teploměr [online] [Cit. 3.5.2017]. Dostupné z: [http://www.hotair.cz/images/produkty/1/1272/digitalni-teplomer-pt-2\\_0.jpg?s=258792](http://www.hotair.cz/images/produkty/1/1272/digitalni-teplomer-pt-2_0.jpg?s=258792)
- [13] Comsol Multiphysics [online] [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: <http://www.comsol.com>
- [14] Matlab [online] [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com>

- [15] Paramo Trafo N [online] [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: [https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti\\_paramo\\_trafo\\_na\\_z2.pdf](https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_paramo_trafo_na_z2.pdf)
- [16] Midel 7131 [online] [Cit. 8.5.2017]. Dostupné z: <http://www.midel.com/productsmidel/midel-7131>
- [17] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-826-9.
- [18] KOTLAN, Jiří. *Základy teoretické elektrotechniky*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995. ISBN 80-7082-172-8.
- [19] ČSN EN 60247: *Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ( $\tan \delta$ ) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Vydání 4. Praha: Český normalizační institut, 1978.



## Seznam příloh

- P. 1: Shell Diala DX: naměřené hodnoty
- P. 2: Shell Diala DX: vypočítané hodnoty
- P. 3: Shell Diala DX: závislost relativní permitivity na teplotě
- P. 4: Shell Diala DX: závislost relativní permitivity na frekvenci
  
- P. 5: Paramo Trafo N: naměřené hodnoty
- P. 6: Paramo Trafo N: vypočítané hodnoty
- P. 7: Paramo Trafo N: závislost relativní permitivity na teplotě
- P. 8: Paramo Trafo N: závislost relativní permitivity na frekvenci
  
- P. 9: Midel 7131: naměřené hodnoty
- P. 10: Midel 7131: vypočítané hodnoty
- P. 11: Midel 7131: závislost relativní permitivity na teplotě
- P. 12: Midel 7131: závislost relativní permitivity na frekvenci
  
- P. 13: Slunečnicový olej: naměřené hodnoty
- P. 14: Slunečnicový olej: vypočítané hodnoty
- P. 15: Slunečnicový olej: závislost relativní permitivity na teplotě
- P. 16: Slunečnicový olej: závislost relativní permitivity na frekvenci
  
- P. 17: Program vytvořený v prostředí MATLAB

## Přílohy

### P. 1: Shell Diala DX: naměřené hodnoty

Tab. P. 1. 1: Naměřená elektrická kapacita Shell Diala DX pro 1 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	139,7	142,2	140,8	140,13	139,5
	40	147,6	147,4	144,4	144,3	144,7
	50	151,8	152,7	150,2	150,14	150,6
	60	153,5	152,2	151,5	150,24	149,9
	70	136,6	138	143,1	135,8	135,7
	80	136	136,5	133,3	132,7	132,5
	90	133,7	134,3	132,26	131,8	132,15

Tab. P. 1. 2: Naměřená elektrická kapacita Shell Diala DX pro 2 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	22,5	62,8	63,1	63,14	62,4	62,6
	40	64,5	68	68,66	68,27	68,48
	50	69,7	70,6	69,2	69,6	69,9
	60	74,9	75,1	73,4	74,2	74,27
	70	76,1	76,1	76,7	76,2	76,48
	80	78	78,3	78,78	77,21	77,73
	90	79,5	79,7	80,5	79,1	79,7

Tab. P. 1. 3: Naměřená elektrická kapacita Shell Diala DX pro 3 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	26,4	49,5	49,7	50,5	49,1	49,16
	40	52,3	51,9	51,8	50,4	50,27
	50	53,7	53,4	53,3	52,4	52,04
	60	55,7	55,5	55,4	54,67	54,77
	70	76,6	76,9	76,06	74,7	74,98
	80	86,4	86,8	85,94	84,1	84,9
	90	91,3	91,4	90,56	89,26	89,67

**P. 2: Shell Diala DX: vypočítané hodnoty**

Tab. P. 2. 1: Relativní permitivita Shell Diala DX pro 1 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,9	2,02	2,05	2,01	2,02	1,99
	40	2,14	2,13	2,06	2,08	2,07
	50	2,20	2,20	2,14	2,16	2,15
	60	2,22	2,20	2,16	2,16	2,14
	70	1,98	1,99	2,04	1,95	1,94
	80	1,97	1,97	1,90	1,91	1,89
	90	1,93	1,94	1,89	1,90	1,89

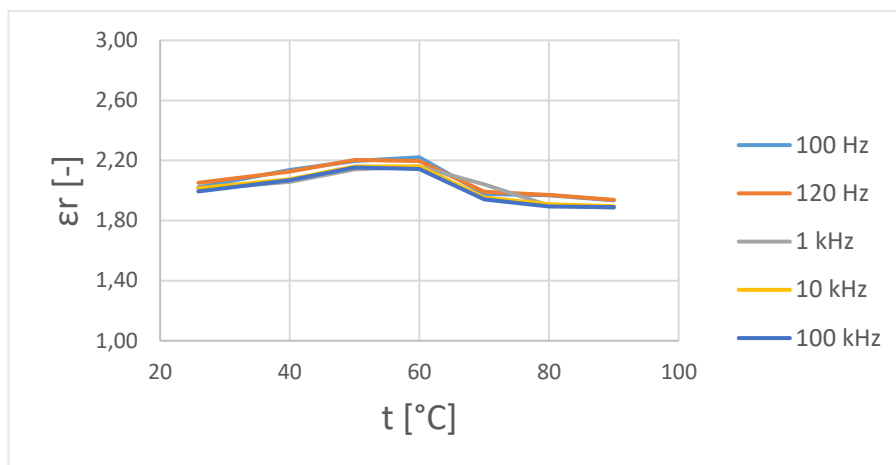
Tab. P. 2. 2: Relativní permitivita Shell Diala DX pro 2 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	22,5	1,91	1,92	1,88	1,89	1,86
	40	1,97	2,07	2,03	2,06	2,04
	50	2,13	2,15	2,11	2,07	2,08
	60	2,28	2,28	2,24	2,20	2,21
	70	2,32	2,31	2,27	2,30	2,27
	80	2,38	2,38	2,34	2,36	2,30
	90	2,42	2,42	2,38	2,41	2,36

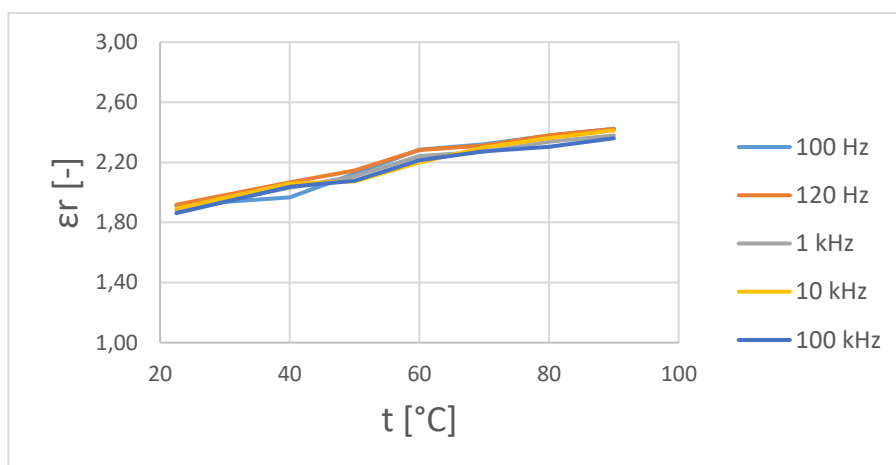
Tab. P. 2. 3: Relativní permitivita Shell Diala DX pro 3 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100,00	120,00	1000,00	10000,00	100000,00
$t$ [°C]	22,5	2,32	2,31	2,30	2,27	2,27
	40	2,46	2,41	2,36	2,33	2,32
	50	2,52	2,48	2,43	2,43	2,40
	60	2,62	2,58	2,53	2,53	2,53
	70	3,60	3,58	3,47	3,46	3,46
	80	4,06	4,04	3,92	3,90	3,92
	90	4,29	4,25	4,13	4,13	4,14

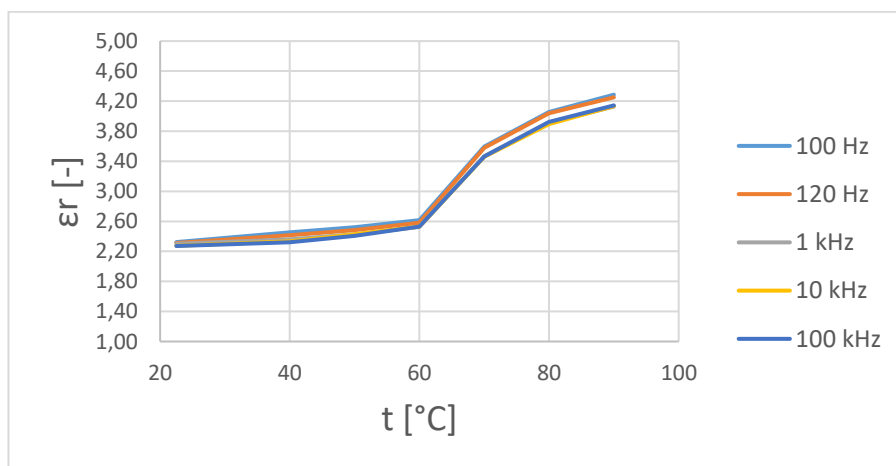
### P. 3: Shell Diala DX: závislost relativní permitivity na teplotě



Obr. P. 3.1: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 1 mm

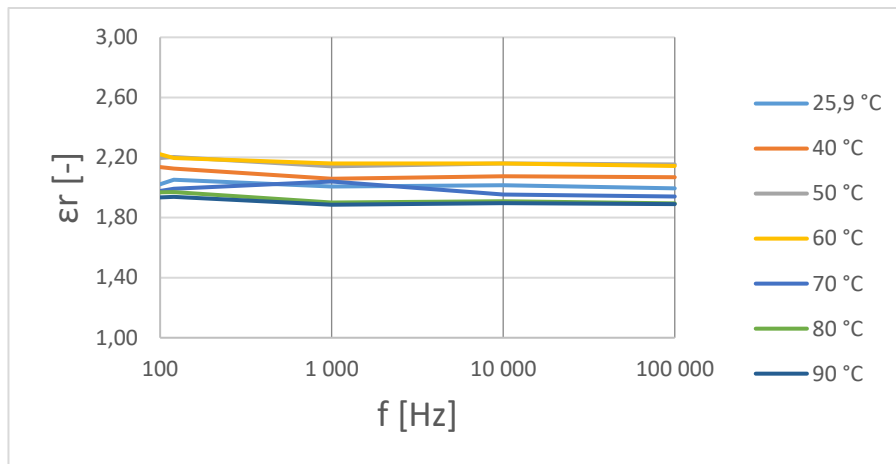


Obr. P. 3.2: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 2 mm

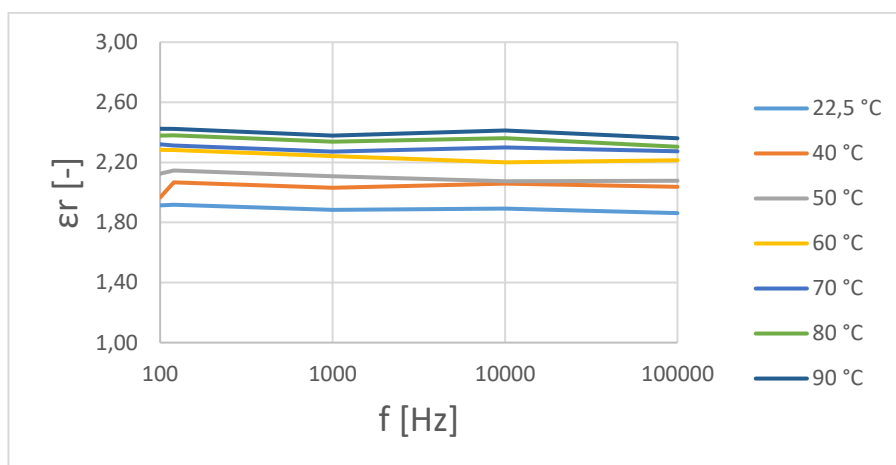


Obr. P. 3.2: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 3 mm

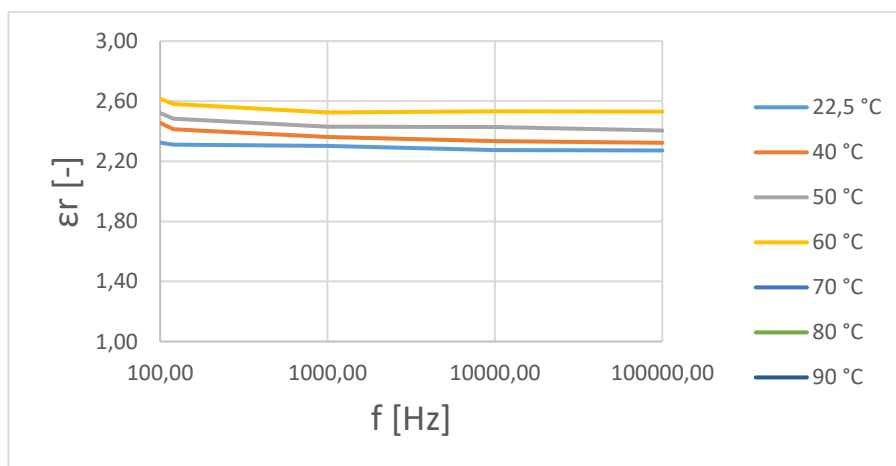
**P. 4: Shell Diala DX: závislost relativní permitivity na frekvenci**



Obr. P. 4.1: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 1 mm



Obr. P. 4.2: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 2 mm



Obr. P. 4.3: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Shell Diala DX se vzdáleností elektrod 3 mm

**P. 5: Paramo Trafo N: naměřené hodnoty**

Tab. P. 5. 1: Naměřená elektrická kapacita Paramo Trafo N pro 1 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	287,1	295,6	255,2	203,2	173,87
	40	335,8	305,7	286,3	204,4	185,4
	50	360,5	336,2	248,4	220,5	203,4
	60	428,2	389,1	265,4	248,7	211,1
	70	478,3	403,3	278,4	245,2	219,4
	80	465,4	405,2	238,2	227,6	216,8
	90	509,1	439,5	216,6	198,2	195,1

Tab. P. 5. 2: Naměřená elektrická kapacita Paramo Trafo N pro 2 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	92,3	92,6	91,4	90,9	91,17
	40	96,5	96,5	96,2	95,5	95,4
	50	100	99,5	100	98,4	97,8
	60	98,2	98,1	97,75	96,81	96,6
	70	99,8	99,9	98,48	98,5	98,3
	80	100,5	100,3	99,4	99,16	98,96
	90	102,6	102,5	100,4	100,57	100,37

Tab. P. 5. 3: Naměřená elektrická kapacita Paramo Trafo N pro 3 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	65,4	65,6	66,9	64,47	64,23
	40	73,8	73,8	73,26	72,39	71,94
	50	74,5	74,3	74,2	73,12	72,5
	60	74,8	74,4	74,35	73,42	72,93
	70	74,5	74,1	74,11	72,98	72,44
	80	75,4	75,7	74,2	73,34	72,77
	90	75,6	75,5	74,6	73,3	72,7

**P. 6: Paramo Trafo N: vypočítané hodnoty**

Tab. P. 6. 1: Relativní permitivita Paramo Trafo N pro 1 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10000	100000
$t$ [°C]	30	4,15	4,27	3,64	2,92	2,49
	40	4,86	4,41	4,08	2,94	2,65
	50	5,22	4,85	3,54	3,17	2,91
	60	6,20	5,61	3,78	3,58	3,02
	70	6,92	5,82	3,97	3,53	3,14
	80	6,74	5,85	3,40	3,27	3,10
	90	7,37	6,34	3,09	2,85	2,79

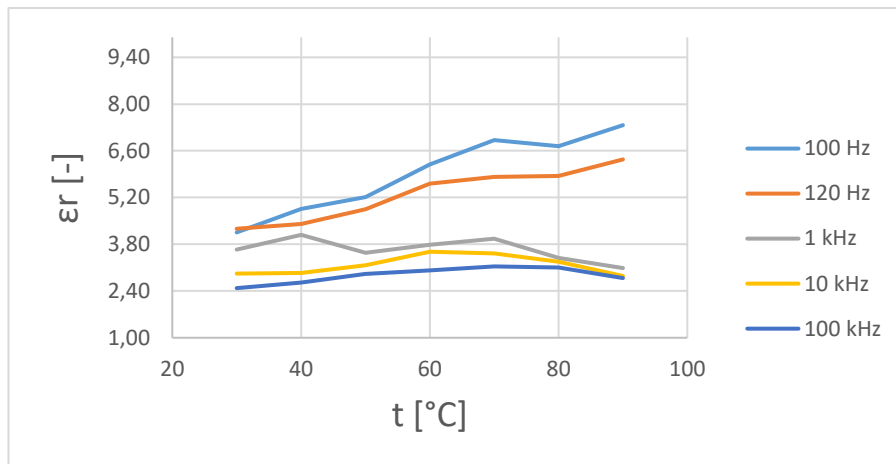
Tab. P. 6. 2: Relativní permitivita Paramo Trafo N pro 2 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	30	2,81	2,81	2,73	2,72	2,72
	40	2,94	2,93	2,87	2,86	2,85
	50	3,05	3,02	2,99	2,95	2,92
	60	2,99	2,98	2,92	2,90	2,88
	70	3,04	3,04	2,94	2,95	2,93
	80	3,06	3,05	2,97	2,97	2,95
	90	3,13	3,12	3,00	3,01	3,00

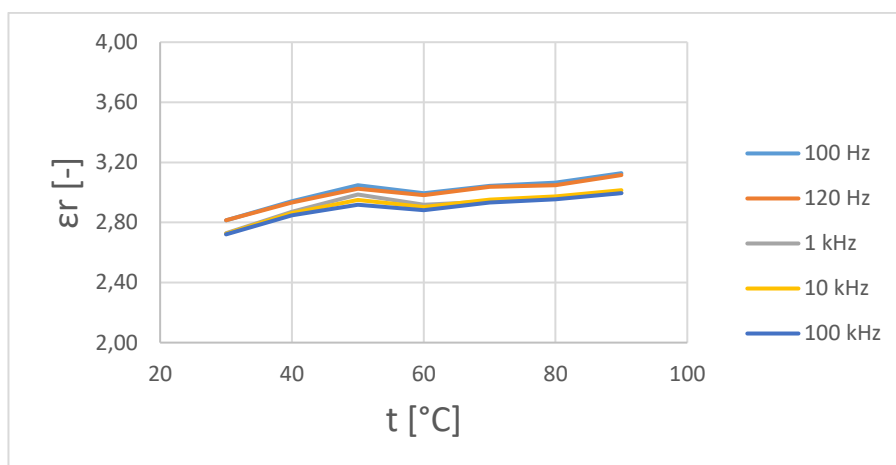
Tab. P. 6. 3: Relativní permitivita Paramo Trafo N pro 3 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,4	3,07	3,05	3,05	2,99	2,97
	40	3,46	3,43	3,34	3,35	3,32
	50	3,50	3,46	3,38	3,39	3,35
	60	3,51	3,46	3,39	3,40	3,37
	70	3,50	3,45	3,38	3,38	3,35
	80	3,54	3,52	3,38	3,40	3,36
	90	3,55	3,51	3,40	3,40	3,36

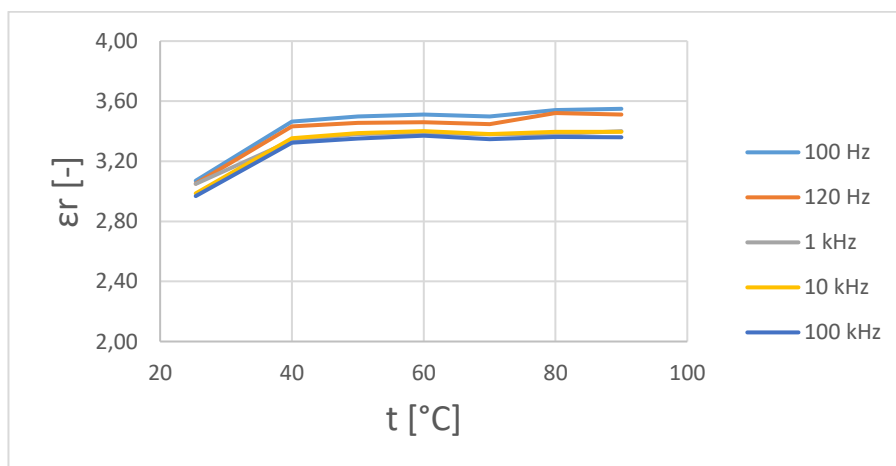
**P. 7: Paramo Trafo N: závislost relativní permitivity na teplotě**



Obr. P. 7.1: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Paramo Trafo N se vzdáleností elektrod 1 mm



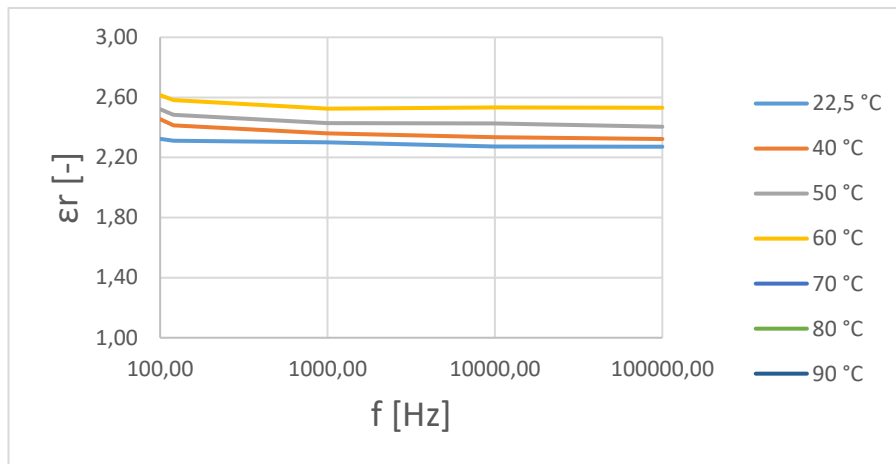
Obr. P. 7.2: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Paramo Trafo N se vzdáleností elektrod 2 mm



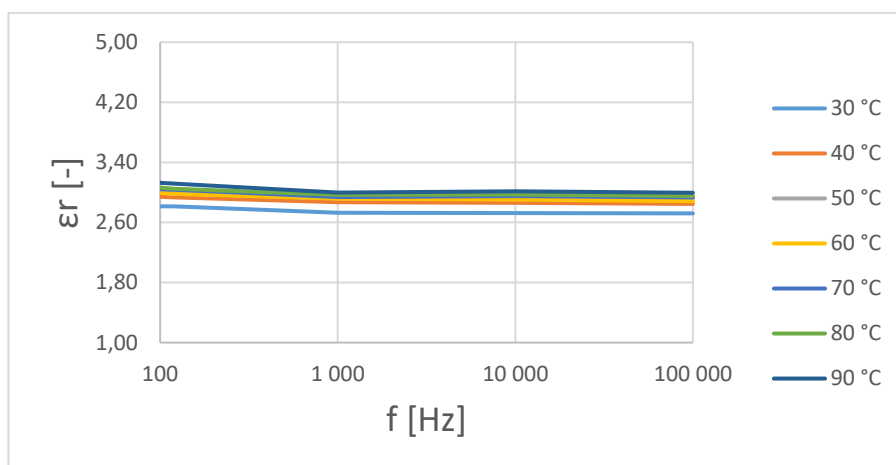
Obr. P. 7.3: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Paramo Trafo N se vzdáleností elektrod 3 mm



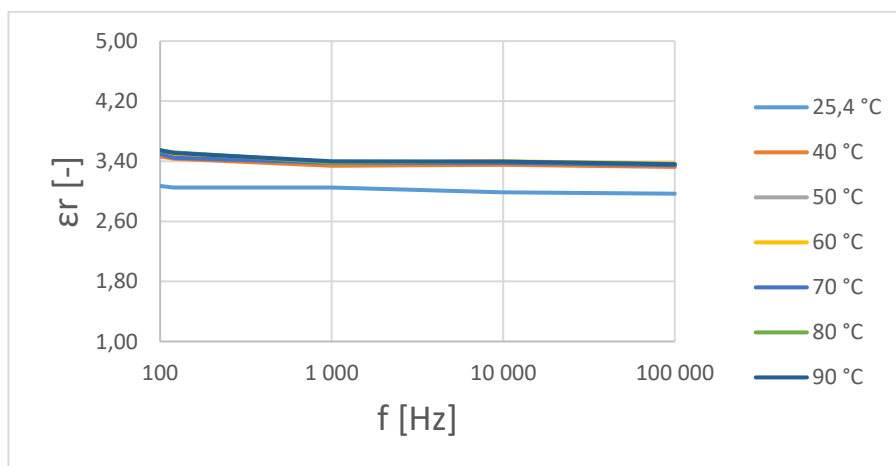
**P. 8: Paramo Trafo N: závislost relativní permitivity na frekvenci**



Obr. 8.1: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Paramo Trafo N se vzdáleností elektrod 1 mm



Obr. 8.2: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Paramo Trafo N se vzdáleností elektrod 2 mm



Obr. 8.3: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Paramo Trafo N se vzdáleností elektrod 3 mm

**P. 9: Midel 7131: naměřené hodnoty**

Tab. P. 9. 1: Naměřená elektrická kapacita Midel 7131 pro 1 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	230	230,7	228,3	228,1	227,9
	40	238,3	238,4	235,9	236,4	236,1
	50	246,2	246,4	246,2	246,3	244,8
	60	255,9	256,6	254,9	255	253,8
	70	261,8	261,7	261,2	260,3	259,8
	80	231,1	231,7	241,5	238,3	235,2
	90	219,1	218,9	220,6	219,3	218,4

Tab. P. 9. 2: Naměřená elektrická kapacita Midel 7131 pro 2 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	115,1	114,7	114,9	113,4	113,5
	40	119,6	119,6	119,33	118,44	118,23
	50	118,7	118,9	118,6	117,9	117,8
	60	120,5	120,5	119,9	119,1	118,9
	70	121,8	121,9	121	120,37	120,14
	80	122	122,2	121,7	120,75	120,47
	90	121,9	121,7	121,2	120,5	120,2

Tab. P. 9. 3: Naměřená elektrická kapacita Midel 7131 pro 3 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	92,3	92,4	92,1	91,25	91,03
	40	94,4	94,6	92,7	93,05	93,12
	50	95,3	95,6	94,8	94,4	94,57
	60	95,67	96,4	95,9	96,63	95,77
	70	93,55	93,45	94,7	94,4	94,4
	80	92,14	91,25	91,86	92,5	92,6
	90	90,7	90,7	91,06	90,1	89,82

**P. 10: Midel 7131: vypočítané hodnoty**

Tab. P. 10. 1: Relativní permitivita Midel 7131 pro 1 mm

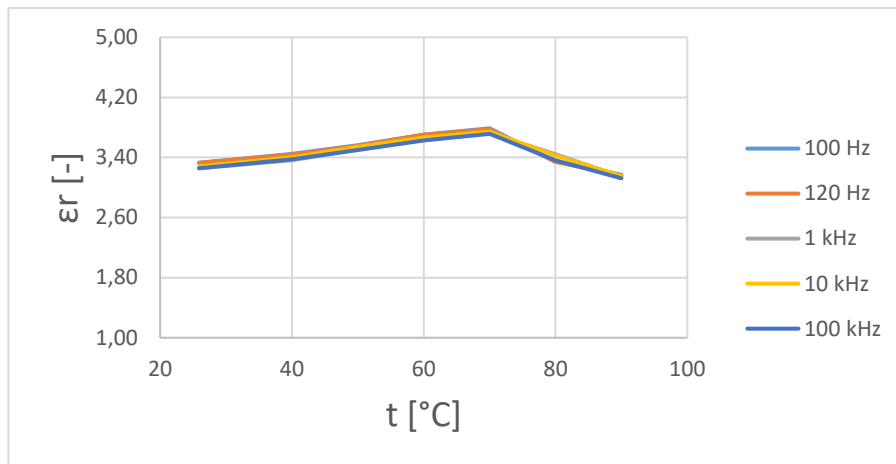
$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,9	3,33	3,33	3,25	3,28	3,26
	40	3,45	3,44	3,36	3,40	3,38
	50	3,56	3,56	3,51	3,54	3,50
	60	3,70	3,70	3,63	3,67	3,63
	70	3,79	3,78	3,72	3,74	3,71
	80	3,34	3,34	3,44	3,43	3,36
	90	3,17	3,16	3,14	3,15	3,12

Tab. P. 10. 2: Relativní permitivita Midel 7131 pro 2 mm

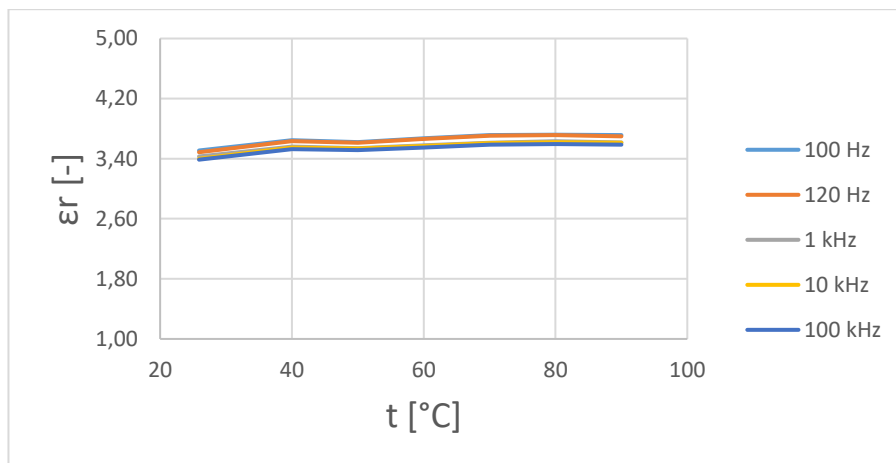
$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,9	3,51	3,49	3,43	3,40	3,39
	40	3,65	3,64	3,56	3,55	3,53
	50	3,62	3,61	3,54	3,53	3,52
	60	3,67	3,66	3,58	3,57	3,55
	70	3,71	3,71	3,61	3,61	3,59
	80	3,72	3,71	3,63	3,62	3,60
	90	3,72	3,70	3,62	3,61	3,59

Tab. P. 10. 3: Relativní permitivita Midel 7131 pro 3 mm

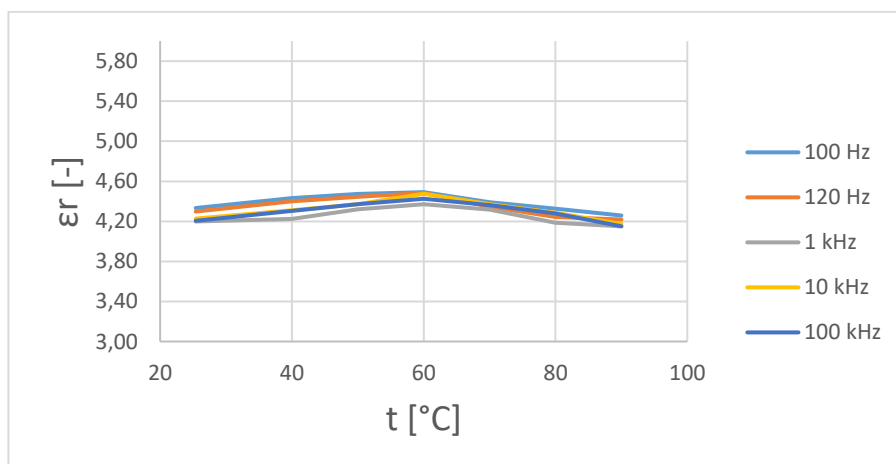
$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,4	4,33	4,30	4,20	4,23	4,21
	40	4,43	4,40	4,23	4,31	4,30
	50	4,47	4,45	4,32	4,37	4,37
	60	4,49	4,48	4,37	4,48	4,43
	70	4,39	4,35	4,32	4,37	4,36
	80	4,33	4,24	4,19	4,28	4,28
	90	4,26	4,22	4,15	4,17	4,15

**P. 11: Midel 7131: závislost relativní permitivity na teplotě**

Obr. 11.1: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Midel 7131 se vzdáleností elektrod 1 mm

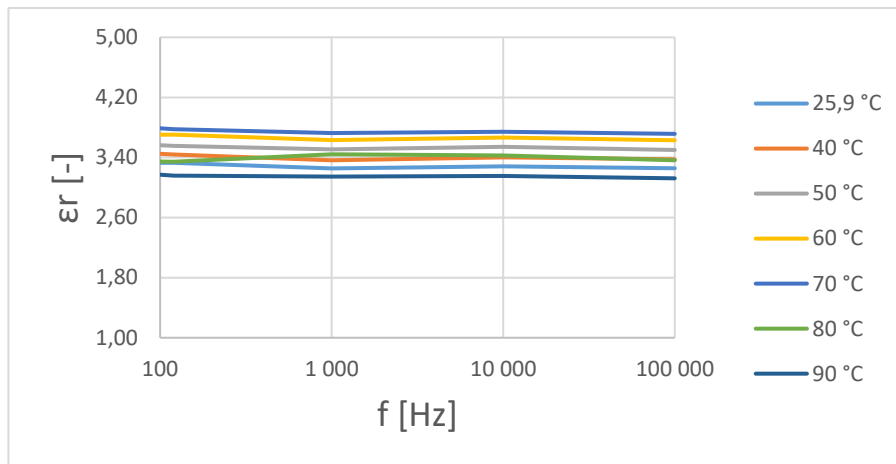


Obr. 11.2: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Midel 7131 se vzdáleností elektrod 2 mm

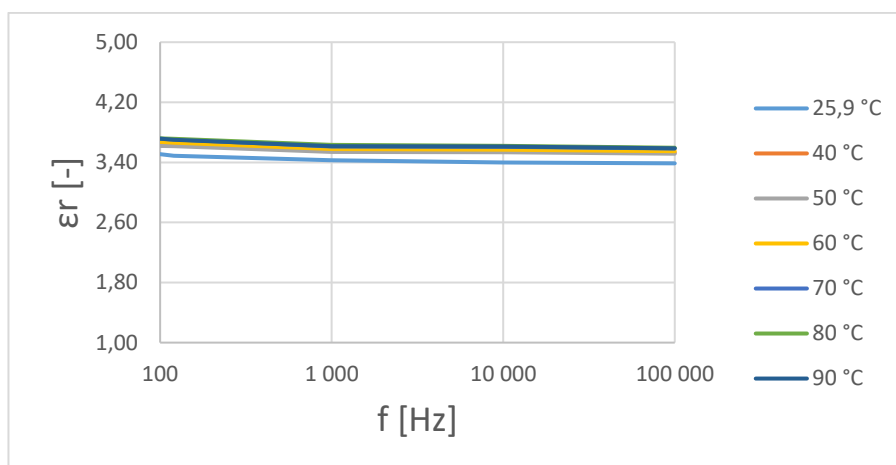


Obr. 11.3: Závislost relativní permitivity na teplotě pro Midel 7131 se vzdáleností elektrod 3 mm

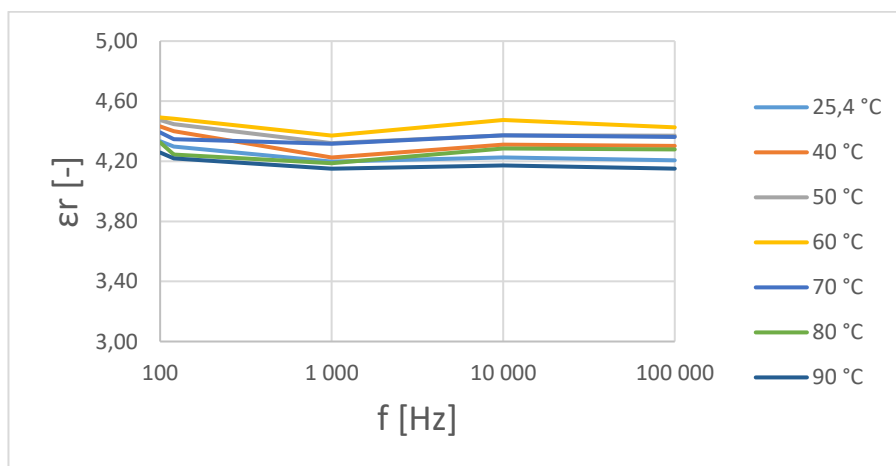
**P. 12: Midel 7131: závislost relativní permitivity na frekvenci**



Obr. 12.1: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Midel 7131 se vzdáleností elektrod 1 mm



Obr. 12.2: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Midel 7131 se vzdáleností elektrod 2 mm



Obr. 12.3: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro Midel 7131 se vzdáleností elektrod 3 mm

**P. 13: Slunečnicový olej: naměřené hodnoty**

Tab. P. 13. 1: Naměřená elektrická kapacita slunečnicového oleje pro 1 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	216,7	216,5	216,5	215,6	215,4
	40	233,1	233,2	232,5	231,7	231,4
	50	231	230,9	231,1	230	229,4
	60	209,3	209,5	209,5	208,3	207,9
	70	205,5	205,5	204	203,1	203,2
	80	212,6	212,1	211,4	210,3	210
	90	216,5	217,1	215,2	214,5	214,2

Tab. P. 13. 2: Naměřená elektrická kapacita slunečnicového oleje pro 2 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	93,9	93,7	93,51	93,14	93,16
	40	106,4	106,7	105,43	104,87	104,9
	50	108,8	109,2	108,32	107,51	107,44
	60	107,7	107,5	107,2	106,6	106,59
	70	105,8	106,5	105,51	104,86	104,9
	80	107,4	107,8	106,9	106,2	106,21
	90	107,7	107,6	107,5	106,67	106,55

Tab. P. 13. 3: Naměřená elektrická kapacita slunečnicového oleje pro 3 mm

C [pF]		f [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
t [°C]	25,9	39,4	39,5	40,59	39,87	40,03
	40	63,1	62,5	62,78	62,57	62,61
	50	64,3	64,9	63,97	64,28	64,13
	60	66,5	66,9	66,96	65,96	65,91
	70	66,8	66,3	64,96	65,9	66,51
	80	67,5	66,9	67,03	66,31	66,29
	90	68,2	68,2	68,39	67,79	67,8

**P. 14: Slunečnicový olej: vypočítané hodnoty**

Tab. P. 14. 1: Relativní permitivita slunečnicového oleje pro 1 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	23,8	3,14	3,12	3,09	3,10	3,08
	40	3,37	3,37	3,31	3,33	3,31
	50	3,34	3,33	3,29	3,31	3,28
	60	3,03	3,02	2,99	3,00	2,97
	70	2,97	2,97	2,91	2,92	2,91
	80	3,08	3,06	3,01	3,02	3,00
	90	3,13	3,13	3,07	3,08	3,06

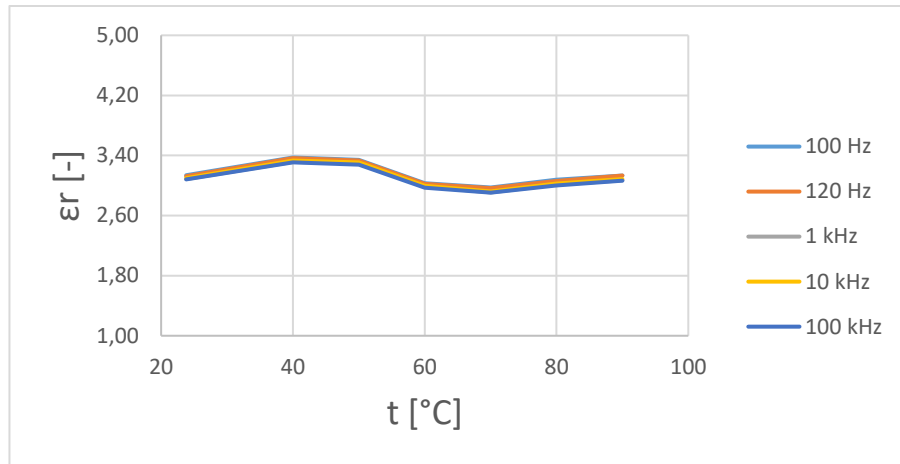
Tab. P. 14. 2: Relativní permitivita slunečnicového oleje pro 2 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,9	2,86	2,85	2,79	2,79	2,78
	40	3,24	3,24	3,15	3,14	3,13
	50	3,32	3,32	3,23	3,22	3,21
	60	3,28	3,27	3,20	3,20	3,18
	70	3,23	3,24	3,15	3,14	3,13
	80	3,27	3,28	3,19	3,18	3,17
	90	3,28	3,27	3,21	3,20	3,18

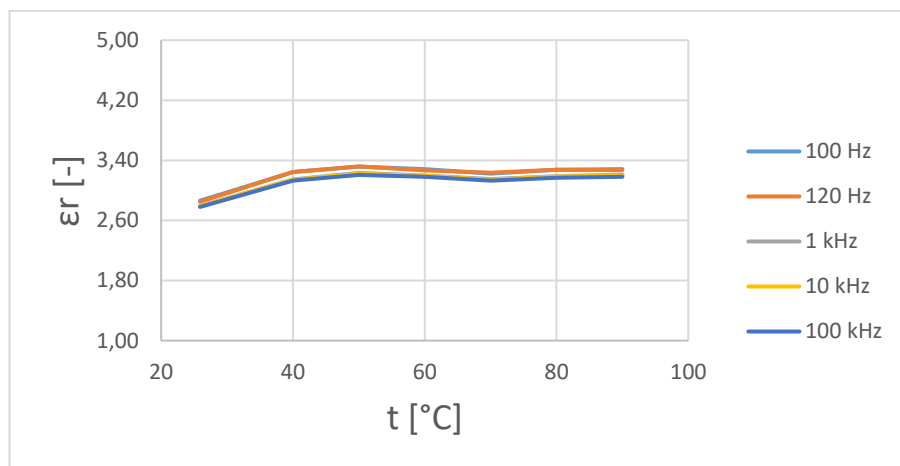
Tab. P. 14. 3: Relativní permitivita slunečnicového oleje pro 3 mm

$\epsilon_r$ [-]		$f$ [Hz]				
		100	120	1000	10 000	100 000
$t$ [°C]	25,9	1,85	1,84	1,85	1,85	1,85
	40	2,96	2,91	2,86	2,90	2,89
	50	3,02	3,02	2,92	2,98	2,96
	60	3,12	3,11	3,05	3,06	3,05
	70	3,14	3,08	2,96	3,05	3,07
	80	3,17	3,11	3,06	3,07	3,06
	90	3,20	3,17	3,12	3,14	3,13

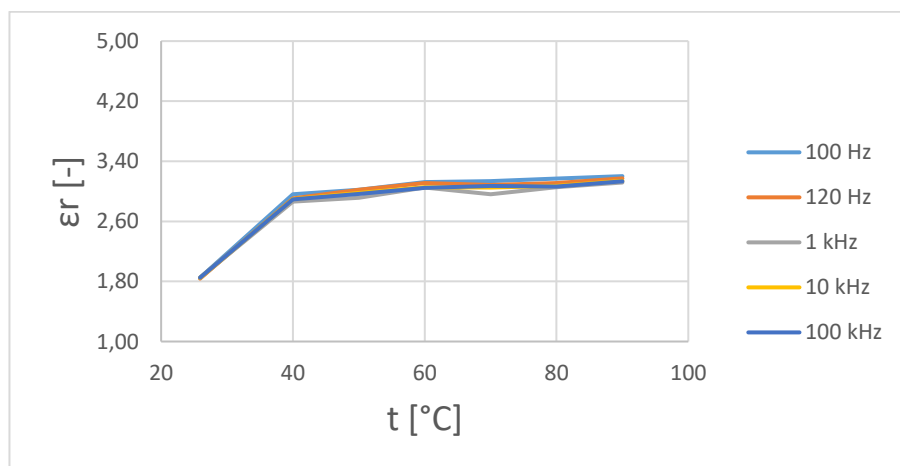
**P. 15: Slunečnicový olej: závislost relativní permitivity na teplotě**



Obr. 15.1: Závislost relativní permitivity na teplotě pro slunečnicový olej se vzdáleností elektrod 1 mm

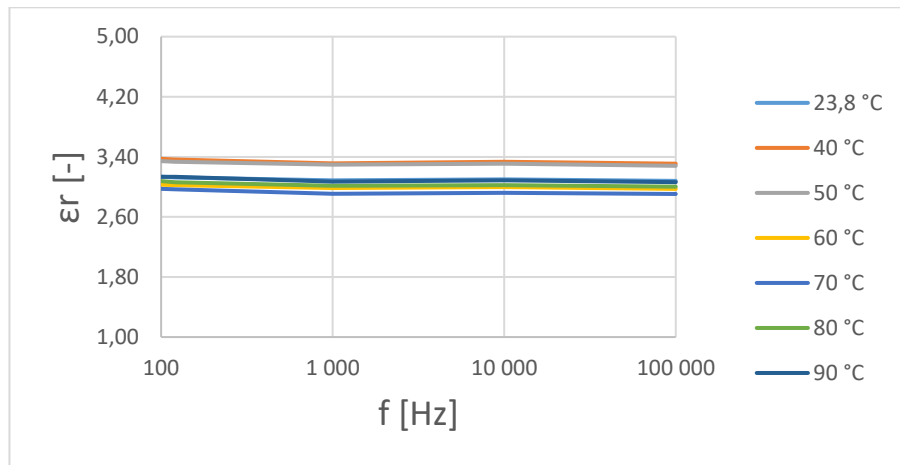


Obr. 15.2: Závislost relativní permitivity na teplotě pro slunečnicový olej se vzdáleností elektrod 2 mm

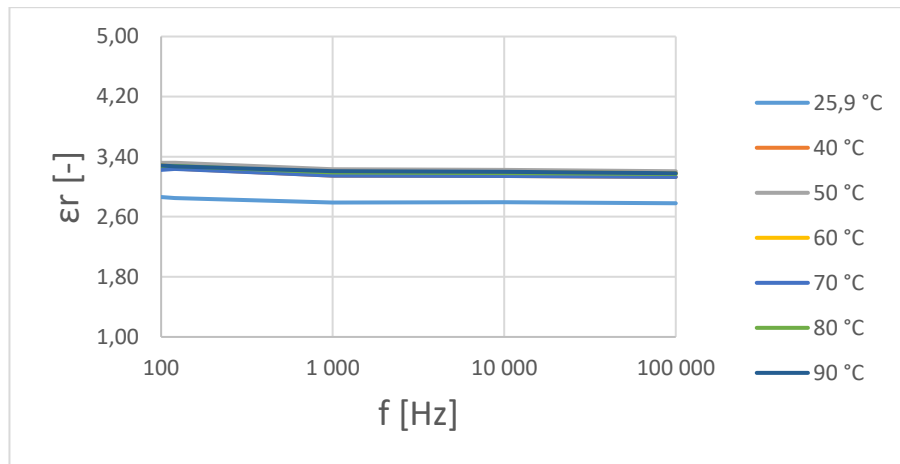


Obr. 15.3: Závislost relativní permitivity na teplotě pro slunečnicový olej se vzdáleností elektrod 3 mm

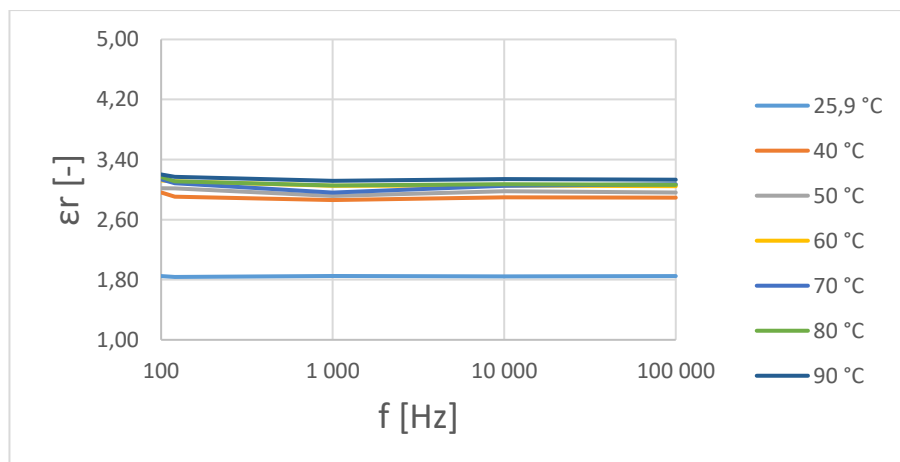


**P. 16: Slunečnicový olej: závislost relativní permitivity na frekvenci**

Obr. 16.1: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro slunečnicový olej se vzdáleností elektrod 1 mm



Obr. 16.2: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro slunečnicový olej se vzdáleností elektrod 2 mm



Obr. 16.3: Závislost relativní permitivity na frekvenci pro slunečnicový olej se vzdáleností elektrod 3 mm

**P. 17: Program vytvořený v prostředí MATLAB**

```
clear; clc;
epsr=[1:10];
C_1mm=[7.371334179555706E-11, 1.4070668950617737E-10, 2.0766771598483139E-10,
2.746164400762648E-10, ...
3.4155917709171633E-10, 4.084985512759603E-10, 4.754358486855376E-10,
5.423717737381439E-10, ...
6.093067446338506E-10, 6.762410253209862E-10];
C_2mm=[4.1007017588910526E-11, 7.538469886815303E-11, 1.0974941464868563E-10,
1.4410902872749539E-10, ...
1.7846611498592E-10, 2.128217651449922E-10, 2.471765213778554E-10,
2.8153068344644015E-10, ...
3.1588443056114163E-10, 3.502378764455972E-10];
C_3mm=[3.008483542069033E-11, 5.3572422035256084E-11, 7.705392274497155E-11,
1.0053300015449504E-10, ...
1.2401086896950376E-10, 1.4748804827796134E-10, 1.7096479713331315E-10,
1.9444125926080024E-10, ...
2.1791752080870582E-10, 2.4139363655565194E-10];
prompt='Zadej hodnotu elektrické kapacity [pF]: ';
C=input(prompt);
clc;
disp(['C = ',num2str(C),' pF']);
disp(' ');
C=C*1e-12;
epsr_1mm=interp1(C_1mm,epsr,C,'spline');
epsr_2mm=interp1(C_2mm,epsr,C,'spline');
epsr_3mm=interp1(C_3mm,epsr,C,'spline');
disp(['pro d = 1 mm je eps_r = ',num2str(epsr_1mm),' [-]']);
disp(' ');
disp(['pro d = 2 mm je eps_r = ',num2str(epsr_2mm),' [-]']);
disp(' ');
disp(['pro d = 3 mm je eps_r = ',num2str(epsr_3mm),' [-]']);
```