



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

MĚŘENÍ PERMITIVITY A ZTRÁTOVÉHO Činitele VODY

MEASUREMENT OF PERMITIVITY AND DISSIPATION FACTOR OF WATER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JANA ZIMÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JIŘÍ ŠPINKA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Studentka: Bc. Jana Zimáková

ID: 77774

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měření permitivity a ztrátového činitele vody

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku elektrických vlastností vody. Navrhněte metodu i vhodné uspořádání elektrod pro měření frekvenční závislosti permitivity a ztrátového činitele vody. Nakreslete vykresovou dokumentaci pro výrobu elektrodového systému pro tato měření. Provedte měření a srovnání různých druhů vod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jiří Špinka

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Špinkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

Bibliografická citace mé práce:

ZIMÁKOVÁ, J. *Měření permitivity a ztrátového činitele vody* : diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 61s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Špínka.

Anotace

Diplomová práce se zabývá dielektrickými vlastnostmi vody. Popisuje základní chemické a fyzikální vlastnosti vody a její rozdělení z hlediska struktury. Dále popisuje základní parametry vody destilované, deionizované a super čisté. V kapitole číslo 5 je popsáno chování dielektrika v elektrickém poli, určování dipólového momentu pomocí Clausiovy– Mossottiho rovnice, měření permitivity a ztrátového činitele. Praktická část se skládá z návrhu elektrodového systému, z měření vlastností vody a vyhodnocení naměřených údajů.

Klíčová slova

Voda, struktura, vlastnosti vody, deionizovaná voda, elektrodový systém, ztrátový činitel, relativní permitivita

Annotation

This master `s thesis deals about the dielectric properties of water. It describes the basic chemical and physical properties of water and its distribution in terms of structure. It also describes the basic parameters of distilled water, deionized and superclean. In the chapter number 5 described the behavior of dielectrics in an electric field, determining the dipole moment by Claus-Mossotti 'equation, measurement of permittivity and loss factor. Practical part is consists of the design of the electrode systém, of measuring the water quality and evaluation of measured data.

Key words

Water, structure, properties of water, deionized water, electrode system, loss factor and relative permittivity

Obsah

1. Úvod.....	- 6 -
2. Základní rozdělení vody	- 7 -
2.1. Podle skupenství.....	- 7 -
2.2. Podle tvrdosti.....	- 8 -
2.3. Podle slanosti (salinity)	- 8 -
2.4. Další rozdělení.....	- 9 -
3. Charakteristické vlastnosti vody.....	- 10 -
3.1. Struktura vody	- 10 -
3.2. Hustota vody.....	- 11 -
3.3. Povrchové napětí	- 12 -
3.4. Hodnota pH.....	- 12 -
3.5. Vodivost.....	- 13 -
3.6. Viskozita.....	- 13 -
4. Voda deionizovaná	- 14 -
4.1. Proces deionizace	- 14 -
4.2. Testování kvality DL vody	- 15 -
5. Dielektrika v elektrickém poli.....	- 16 -
5.1. Stanovení dipólového momentu [9]	- 16 -
5.2. Clausiova – Mossottiho rovnice [9].....	- 18 -
5.3. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$	- 19 -
5.4. Komplexní permitivita.....	- 21 -
5.5. Relativní permitivita	- 22 -
6. Praktická část	- 23 -
6.1. Návrh elektrodového systému	- 23 -
6.2. Měřicí pracoviště	- 25 -
6.3. Měření permitivity a ztrátového činitele	- 26 -
6.3. Ukázka naměřených hodnot	- 29 -
6.4. Zpracování naměřených a vypočtených hodnot	- 31 -
6.4.1. Deionizovaná voda.....	- 32 -
6.4.2. Pitná voda.....	- 41 -
7. Závěr.....	- 48 -
8 Seznam zkratk	- 50 -
9. Seznam obrázků	- 51 -
10. Seznam tabulek.....	- 52 -
11. Použitá literatura.....	- 53 -
12. Přílohy	- 54 -

1. Úvod

Voda je nedílnou součástí našeho života. Země vyniká mezi planetami sluneční soustavy svojí hydrosférou. Je to prostor na povrchu, pod povrchem i v zemské atmosféře, kde se vyskytuje a pohybuje voda v různých skupenstvích. Pod pojmem hydrosféra (vodní obal země) rozumíme tedy vodu v oceánech a mořích a vodu na povrchu souše. Patří sem i voda vázaná v ledovcích a organizmech, půdní, podzemní a atmosférická voda. Voda patří k nejrozšířenějším látkám na Zemi a je v neustálém koloběhu. Pro člověka má prvořadý význam podzemní voda jako pitný zdroj, řeky a jezera jako zdroj energie a spolu s půdní a atmosférickou vodou jako zdroj vláhy. Má také velký význam na udržení stability našeho klimatu a to především kvůli své tepelné kapacitě, díky které je schopná akumulovat velké množství energie.

Voda je chemická sloučenina vodíku a kyslíku, s chemickým označením H_2O . Je důležitá především pro vznik a vývoj veškerých organismů na Zemi. Organismy obsahují v průměru 60-99% vody. Za normální teploty a tlaku se jedná o bezbarvou, čirou kapalinu bez zápachu. Moře a oceány pokrývají více jak 361 milionů km^2 , čili 71 % povrchu planety Země a jejich objem dosahuje 1 370 milionů km^3 vody. V silnějších vrstvách má voda namodralé zbarvení, odtud se pochází označení Země jako „modrá planeta“.

Voda má také velký vliv na utváření naší planety. Na samotný povrch působí svými erozními vlivy. Především rozrušuje horniny, vymývá ve vodě rozpustné chemické sloučeniny. Vodní toky sebou do moří odnášejí velké množství pevné složky půdy, úlomků hornin a podobně, což má za následek změny ve tvarech jednotlivých koryt řek.

Jelikož se s vodou setkáváme každý den, rozhodla jsem se věnovat právě této problematice.

Ve své diplomové práci jsem se zaměřila na elektrické vlastnosti vody, především na její permitivitu a ztrátový činitel. Sledovala jsem změny hodnot při měření na vzorcích deionizované a pitné vody. Měření probíhalo na elektrodovém systému Agilent 16452A.

2. Základní rozdělení vody

2.1. Podle skupenství

Skupenství (stav) je forma látky lišící se uspořádáním částic a projevující se svými typickými vlastnostmi. U vody rozlišujeme 3 druhy skupenství:

- Led - pevné skupenství vody, vyznačuje se pevným, pravidelným uspořádáním částic. Má své specifické místo mezi minerály. Při běžném tlaku tuhne voda v led při teplotě okolí 0°C. Pokud jsou ve vodě rozpuštěny nějaké soli či jiné příměsi, může voda zůstat kapalná i při nižších teplotách.
- Kapalné skupenství – částice jsou drženy pohromadě slabými silami ale již nejsou pravidelně uspořádány. Kapalina nejde stačit, musí se uchovávat v nádobách – nedrží svůj tvar jako pevná látka, rozlévá se.
- Pára – plynné skupenství – částice plynu nejsou již drženy žádnými silami, ovlivňují se pouze vzájemnými srážkami. Jsou stlačitelné. Musí se uchovávat v těsných nádobách (jinak se začnou mísit s atmosférou).

V minulosti se pára používala hlavně jako pohon pro parní stroje. Pára je sama o sobě velmi důležitá pro vzdušnou vlhkost a je nezbytnou součástí života mnoha rostlin.

Voda umožňuje pouze 2 druhy skupenských přeměn a to:

- přeměna ze skupenství pevného na kapalné (a naopak) – tání (opačný jev se nazývá tuhnutí). Pro tuto přeměny je nutno dodat skupenské teplo tání, čímž dojde k porušení vazeb, které drží částice v pevné látce.
- přeměna ze skupenství kapalného na plynné (a naopak) – vypařování (opačný jev - kondenzace). Aby těleso přešlo z kapalné fáze do plynné, musíme mu dodat skupenské teplo varu.

2.2. Podle tvrdosti

Tvrdost vody se určuje podle obsahu rozpuštěného vápníku a hořčíku ve vodě. Měří se v různých jednotkách, v České republice je to nejčastěji v tzv. německých stupních ($^{\circ}\text{dH}$ nebo $^{\circ}\text{N}$). Přesně se tvrdost vody určuje pomocí kapkového testeru tvrdosti vody. Pokud voda obsahuje vápníku a hořčíku více jak 14°dH , začíná se tvořit vodní kámen (to se projeví např. zanášením vodovodního potrubí)

- velmi měkká voda – obsah vápníku a hořčíku méně než $2,8^{\circ}\text{dH}$
- měkká voda – obsah $3,9 - 7^{\circ}\text{dH}$
- středně tvrdá voda – $7 - 14^{\circ}\text{dH}$
- tvrdá voda – $14 - 21^{\circ}\text{dH}$
- velmi tvrdá voda - více jak 21°dH

2.3. Podle slanosti (salinity)

- slaná voda – voda, která obsahuje chemické látky způsobující slanost. Na Zemi se slaná voda vyskytuje především v mořích a oceánech. Tyto vody mají průměrnou salinitu kolem $3,5\%$, což znamená, že každý kilogram slané vody obsahuje 35g soli. Tato voda zamrzá při teplotě -2°C .
- sladká voda – nízká koncentrace rozpuštěné soli. Může být pitná i nepitná. Velké množství sladké vody je vázáno v ledovcích.
- brakická voda – koncentrace soli je mezi vodou slanou a sladkou. Vyskytuje se v místech, kde se slaná voda mísí se sladkou (nejčastěji ústí řek).

2.4. Další rozdělení

- podle neutronů v atomu vodíku
 - lehká voda
 - polotěžká voda
 - těžká voda
 - triniová voda

- podle hydrologie
 - povrchová
 - podpovrchová
 - voda v atmosféře

- podle mikrobiologie
 - pitná voda
 - užitková voda
 - odpadní voda

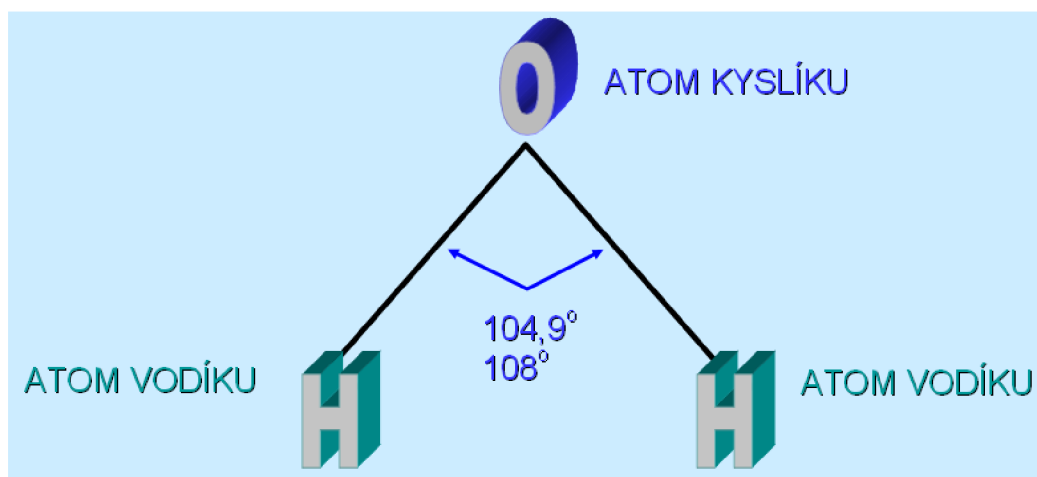
- podle obsahu živin
 - ultraoligotrofní vody (velmi slabě úživné vody)
 - oligotrofní vody (slabě úživné)
 - dystrofní vody – obsahují velké množství huminových kyselin
 - mesotrofní
 - eutrofní
 - polytrofní
 - hypertrofní (vysoce úživné)

3. Charakteristické vlastnosti vody

3.1. Struktura vody

Z chemického hlediska je voda jednoduchou sloučeninou. Její sumární vzorec je H_2O . Tvoří ji tedy 2 atomy vodíku a jeden atom kyslíku. Vzhledem k tomu, že přírodní vodík a kyslík jsou složeny z více izotopů, tak ani voda není složena z jednoho druhu molekul. Existují 3 izotopy vodíku – lehký vodík 1H , těžký vodík – deuterium 2H , resp. D a trícium 3H , resp. T a 6 izotopů kyslíku - ^{14}O , ^{15}O , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , ^{19}O , což dohromady teoreticky dává 36 možností pro stavbu molekuly vody. Mimo již zmíněných molekul $^1H_2^{16}O$ jsou ve vodě v největší míře přítomné molekuly oxidu deutérného $^2H_2^{16}O$ ($D_2^{16}O$), tzv. těžké vody. Její reaktivita je však všeobecně menší a reakce v ní probíhají pomaleji. V přírodních vodách různého původu se obsah deuteria výrazně měřitelně liší.

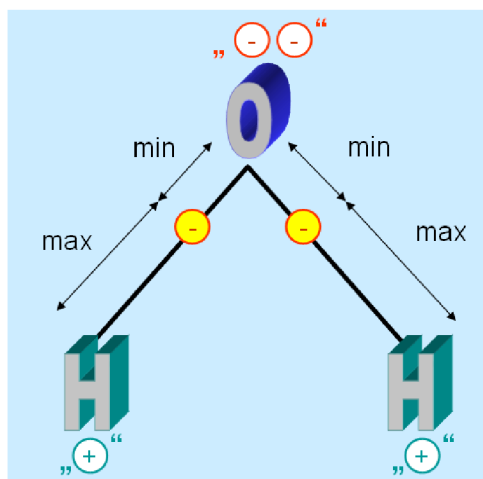
Dva atomy vodíku a jeden atom kyslíku jsou v molekule vody vázány jednoduchou polární kovalentní vazbou $H \rightarrow \overset{\ominus}{O} \leftarrow H$. Vazební úhel je $104,4^\circ$ (obrázek 1). Vazba $O \leftarrow H$ je v molekule velmi polární a molekula je zalomená (má trojúhelníkový tvar). Voda je celkově silně polární látka.



Obrázek 1: molekula vody – atomární skladba [7]

Dipóly vody se můžou ve svém nejbližším okolí přitahovat svými opačně nabitými konci, čímž se vytvoří vodíkové můstky (obrázek 2). Vodík je k jednomu atomu připoutaný kovalentně, ke druhému elektrostaticky. Vnitřní molekulové můstky jsou příčinou vysoké teploty varu ($100^\circ C$).

Voda má molekuly uspořádané v neobyčejně otevřené struktuře. Díky tomu je voda jednou z mála látek, které při tuhnutí zvětšují svůj objem asi o 9,2%. Objemové změny při teplotách mrazu zvýrazňují erozní činnost vody v přírodě.



Obrázek 2: nerovnováha kladného a záporného pólu – vznik vodíkového můstku [7]

3.2. Hustota vody

Hustota kapalné vody se od 0°C zvětšuje a při teplotě 3,98°C má maximální hustotu ($\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Potom plynule klesá až po teplotu varu (při 100°C je $\rho=958,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Tato anomálie má velký význam pro život ve vodě i pro praktické použití. Při chladnutí do 4°C voda klesá ke dnu, ale voda chladnější jako 4°C (protože je lehčí), zůstává na povrchu, kde se při dalším snižování teploty mění na led. Led jako lehčí látka plave na vodě a chrání ji tak před dalším promrzáním. Nebýt této anomálie, zamrzly by všechny vody až ke dnu a zanikl by tak veškerý vodní život.

3.3. Povrchové napětí

Voda má mezi všemi běžnými kapalinami největší povrchové napětí. To vzniká na rozhraní kapalina – plyn. Při 20°C je jeho hodnota $72,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Povrchové napětí s teplotou klesá. Vysoké povrchové napětí má za následek schopnost smáčení, tvorbu pěny, zadržování prachu na povrchu vody apod. Jeho hodnotu snižují prací prostředky a smáčedla.

Fyzikálně lze povrchové napětí σ vyjádřit jako podíl velikosti povrchové síly F a délky l okraje povrchové blány, na který povrchová síla působí kolmo v povrchu kapaliny

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad [\text{N/m}] \quad (1)$$

3.4. Hodnota pH

Hodnota pH charakterizuje, do jaké míry je daný vzorek kyselý či zásaditý. Je to záporně vzatý logaritmus koncentrace vodíkových iontů. Pro neutrální hodnoty se pohybuje hodnota pH kolem 7. Čím je hodnota nižší, tím je roztok kyselější, naopak vyšší hodnoty jsou u alkalických roztoků.

Hodnota pH vody je závislá na chemickém a biologickém znečištění vody a na teplotě. Hodnota pH vody významně ovlivňuje chemické a biochemické procesy ve vodě a proto její stanovení je nezbytnou součástí každého rozboru vody. Umožňuje rozlišit jednotlivé formy výskytu některých prvků ve vodách, je jedním z hledisek posuzování agresivity vody a ovlivňuje účinnost většiny chemických, fyzikálně – chemických a biologických procesů používaných při úpravě a čištění vod.

Mezní hodnota pH pro pitnou vodu je 6,5 až 9,5 pro balené vody může být nižší. Optimální hodnota pH pro ryby se pohybuje v rozmezí 6,5 až 8,5. Pro vodárenské toky platí hodnota pH 6,0 až 8,0 a pro ostatní povrchové vody v rozmezí 6,0 až 9,0. Ve vodě vhodné pro závlahu by mělo pH být od 4,5 do 9,0. Destilovaná voda zbavená oxidu uhličitého má při 25°C pH hodnotu 7, při 100°C klesá pH na 6,1. Při 0°C je pH hodnota 7,5.

3.5. Vodivost

Měrná elektrická vodivost (konduktivita), dále jen měrná vodivost roztoku, (konduktivity γ), je definována jako převrácená hodnota měrného odporu (rezistivity ρ), který je definován jako podíl intenzity elektrického pole a proudové hustoty. Elektrický odpor (rezistance) R (Ω) vodiče o průřezu S (cm^2) a délce l (cm) je vyjádřen vztahem:

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ nebo } R = \frac{l}{\gamma S}, \text{ kde } \gamma = \frac{1}{\rho} \frac{l}{S} \quad (2)$$

3.6. Viskozita

Viskozita (η) je fyzikální veličina, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami proudící kapaliny. Jedná se o veličinu, která charakterizuje vnitřní tření kapaliny a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mezi částicemi mají větší viskozitu, větší viskozita zpomaluje pohyb kapaliny nebo těles v kapalině.

Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké). Viskozita tělesných tekutin se většinou udává v relativních jednotkách, kdy 1 = viskozita vody. Viskozita plazmy je 2 (2 krát vyšší než viskozita vody), viskozita krve je vzhledem k obsahu krvinek vyšší než u plazmy a její průměrná hodnota je 4.

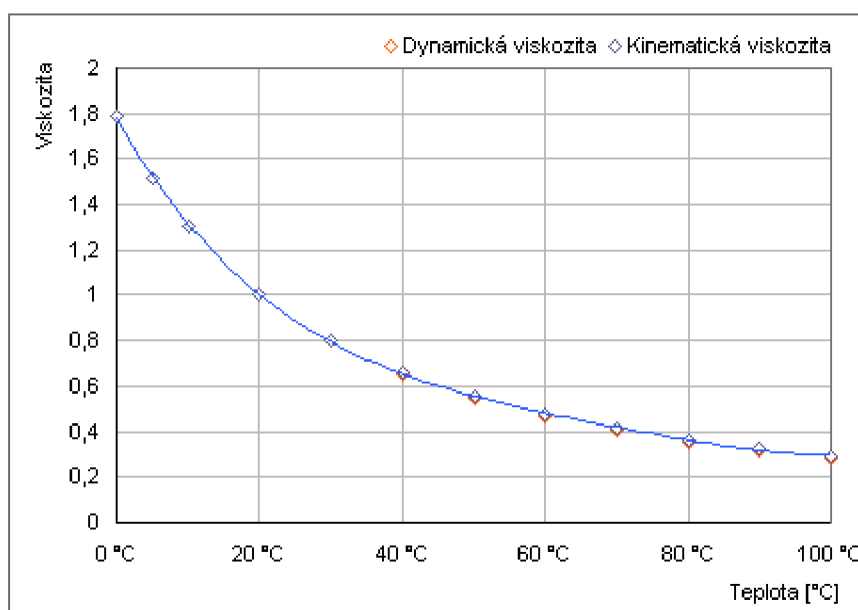
$$\eta = \sigma \frac{\Delta x}{\Delta v} \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad (3)$$

Δx = vzdálenost vrstev, Δv = rozdíl rychlostí, σ = tečné napětí (F/A)

Dynamická viskozita = síla tření, která vzniká mezi dvěma vrstvami proudící kapaliny, které se stýkají plochou 1 m^2 a rozdíl jejich rychlostí je 1 ms^{-1} .

Kinematická viskozita:
$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (4)$$

Viskozita kapalin se stoupající teplotou klesá (obrázek 3), při nižších teplotách se mohou molekuly shlukovat ve větší celky.



Obrázek 3: Závislost viskozity vody na teplotě [2]

4. Voda deionizovaná

Před lety byla vysoce čistá voda používaná jen v omezeném množství aplikací. Dnes se deionizovaná voda (zkráceně DL) stala základní složkou ve stovkách aplikací: zdravotnictví, laboratorní využití, farmacie, kosmetika, elektronika, zpracování potravin a další.

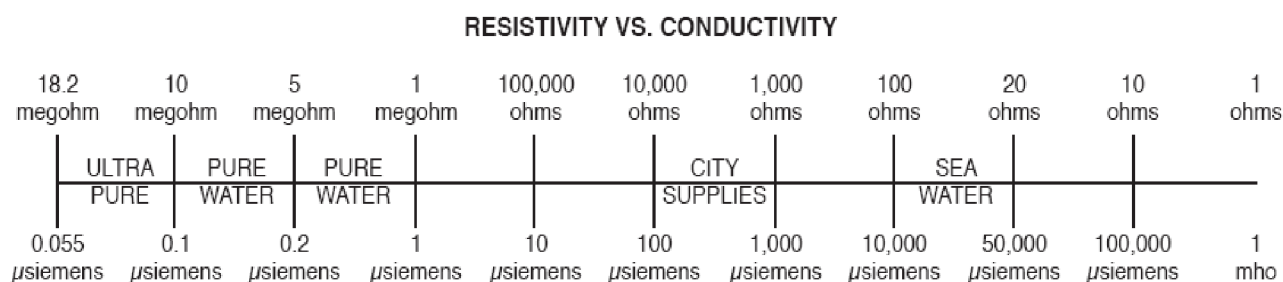
4.1. Proces deionizace

Drtivá většina rozpuštěných nečistot ve vodě jsou ionty, jako je vápník, sodík, chloridy atd. Deionizace je proces odstraňování rozpustných solí z vody iontovou výměnou, která se uskutečňuje pomocí iontoměničů. Tyto iontoměniče - katexy a anexy mají schopnost zachytit ionty solí přítomných ve vodě a vyměňovat je za vodíkové a hydroxilové ionty. Katexy odstraňují kationty rozpuštěných solí a anexy anionty rozpuštěných solí. Deionizační

stanice může být tvořena buď oddělenou katexovou a anexovou kolonou (náplní), jenž jsou zapojeny v sérii, nebo jednou smíšenou katexo-anexovou kolonou (Mix-Bed). Po vyčerpání výměnné kapacity iontoměničů se katex regeneruje kyselinou chlorovodíkovou HCl a anex hydroxidem sodným NaOH, přičemž obě chemikálie jsou do deionizační linky přísávány deionizovanou vodou čerpanou z akumulární nádrže u automatických demineralizačních stanic.

4.2. Testování kvality DL vody

Kvalita DL vody po použití iontoměničů je vždy rozdílná a závisí na druhu použitého iontoměniče, na průtoku, kapacitě apod. Proto je pro mnohé aplikace třeba znát přesnou kvalitu této vody. K tomuto účelu nejlépe slouží měření odporu resp. vodivosti. Čistá voda je špatný elektrický vodič s odporem 18,2 MΩ a vodivostí 0,055 μS. Schopnost vést elektřinu proto závisí na hodnotě koncentrace příměsí (solí). Vzhledem k tomu, že teplota výrazně ovlivňuje vodivost vody, jsou tabulkové hodnoty měřeny při teplotě 25°C. Z tabulky na obr.1 jasně vyplývá, vzájemná závislost mezi odporem a vodivostí. Jak již bylo řečeno dříve, čistá voda má největší odpor a proto nejmenší vodivost. Naproti tomu voda mořská, která obsahuje velk množství příměsí (solí) má největší vodivost.



Obrázek 4: hodnoty odporu a vodivosti pro jednotlivé typy vod [6]

5. Dielektrika v elektrickém poli

5.1. Stanovení dipólového momentu [9]

V molekule vody nastává nahromadění elektronů na straně kyslíku. Tato část je nabitá záporně, část s vodíkovými atomy je nabitá kladně. Takovéto molekuly označujeme jako polární molekuly. Molekula vody je silně polární a má vlastnosti dipólu. V elektrickém poli se molekuly vody orientují určitým způsobem, a to opačně nabitou částicí k elektricky nabitému tělesu. Polární molekuly mají zřetelně vyhraněné dipóly – kladný a záporný. Stupeň polárnosti molekul charakterizujeme hodnotou dipólového momentu m definovaného vztahem:

$$m = q \cdot l \quad [\text{C} \cdot \text{m}] \quad (5)$$

kde l je vzdálenost mezi póly dipólu (jedná se o délku dipólu, jednotka metry [m]) a q je náboj dipólu (náboj na jednom pólu, jednotka coulomb [C]).

Dipólový moment je veličina, která má nejen určitou absolutní hodnotu ale také směr (vektorovou povahu). Dipólový moment molekuly vody má hodnotu $6,01 \cdot 10^{-30}$ C.m.

Dipóly na sebe vzájemně působí svými opačně nabitými konci a můžou vytvářet řetězovité útvary s proměnlivou délkou a tvarem. Na tyto řetězce má vliv teplota – jejím zvyšováním se řetězce trhají.

Polární kapaliny jsou tvořeny souborem dipólových molekul o stálém dipólovém momentu μ . Určení vztahu mezi relativní permitivitou kapaliny a koncentrací, resp. polarizovatelností molekul vyžaduje znát intenzitu lokálního elektrického pole, které se v důsledku silnějšího vzájemného působení dipólových molekul podstatně odlišuje od lokálního pole Mosottiho.

V polárních kapalinách se silně sníženou koncentrací dipólových molekul lze uvažovat s nevýznamným vzájemným působením molekul, takže intenzita lokálního elektrického pole může být alespoň přibližně popsána Mosottiho vztahem. Potom je možno relativní permitivitu stanovit z Clausiusovy – Mosottiho rovnice, za uvažování příspěvků elektronové a dipólové polarizace:

$$\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon' + 2} = \frac{n}{3\varepsilon_0} (\alpha_e + \alpha_d) \quad (6)$$

kde α_e a α_d značí elektronovou, resp. dipólovou polarizovatelnost, jednotka $\text{Cm}^2\text{V}^{-1} = \text{F m}^2$.
Zavedením měrné hmotnosti γ a poměrné molekulové hmotnosti M známým vztahem

$$n = \frac{N_A \cdot \gamma}{M} \quad [\text{m}^{-3}] \quad (7)$$

a rozepsáním výrazu na pravé straně rovnice se dá (6) přepsat do tvaru

$$\frac{M}{\gamma} \cdot \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon' + 2} = \frac{N_A \cdot \alpha_e}{3\varepsilon_0} + \frac{N_A \cdot \alpha_d}{3\varepsilon_0} = P' \quad , \quad (8)$$

v němž $P' [\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}]$ označuje molární polarizaci.

V oblasti vysokých kmitočtů elektrického pole, kdy dipólové molekuly nestačí při své orientaci sledovat změny polarity vnějšího elektrického pole, se přestává projevovat dipólový polarizační mechanismus. Uplatňuje se pouze polarizace elektronová a relativní permitivita nabývá charakteru optické permitivity, pro niž lze psát:

$$\frac{M}{\gamma} \cdot \frac{\varepsilon_\infty - 1}{\varepsilon_\infty + 2} = \frac{N_A \cdot \alpha_e}{3\varepsilon_0} \quad (9)$$

nebo po dosazení $\varepsilon_\infty = n_D^2$:

$$\frac{M}{\gamma} \cdot \frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2} = \frac{N_A \cdot \alpha_0}{3\varepsilon_0} = R' \quad . \quad (10)$$

Veličina $R' [\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}]$ se nazývá molární refrakcí.

Spojením (8) a (10) možno vyjádřit vztah mezi polární polarizací a molární refrakcí ve tvaru

$$P' = R' + \frac{N_A \cdot \alpha_d}{3\epsilon_0} \quad (11)$$

Zavede-li se do (11) za dipólovou polarizovatelnost vztah

$$\alpha_d = \frac{\mu^2}{3kT} \quad , \quad (12)$$

odvozený za předpokladu existence volné otáčivosti dipólových molekul a za aproximace Langevinovy funkce pro $\mu E / kT \ll 1$, bude

$$P' = R' + \frac{N_A \mu^2}{9\epsilon_0 kT} \quad . \quad (13)$$

Z (13) pak plyne pro dipólový moment molekuly

$$\mu = 3 \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot kT}{N_A} \cdot (P' - R')} \quad . \quad (14)$$

5.2. Clausiova – Mossottiho rovnice [9]

Jak již bylo uvedeno výše, pomocí této rovnice jsme schopni vypočítat permitivitu ze známých polarizovatelností, nebo také naopak, vypočítat polarizovatelnost ze změřených hodnot permitivity. Při předpokladu existence jediného polarizačního mechanismu, vycházíme z rovnice:

$$P = n\alpha E_i = n\alpha \left(E + \frac{P}{3\epsilon_0} \right) = n\alpha \left[E + \frac{(\epsilon_r - 1)\epsilon_0 E}{3\epsilon_0} \right] \quad (15)$$

Polarizaci \mathbf{P} vystupující na levé straně rovnice (15) lze také vyjádřit pomocí permitivity a intenzity elektrického pole. Můžeme tedy napsat:

$$(\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E = n\alpha \left[E + \frac{(\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E}{3\varepsilon_0} \right] \quad (16)$$

odtud se po dalších úpravách obdrží Clausiova-Mosottiho rovnice:

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} n\alpha \quad (17)$$

Je to základní rovnice vyjadřující vztah mezi polarizovatelností α jednotlivých částic přispívajících k celkové polarizaci a permitivitou dielektrika ε_r

5.3. Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$

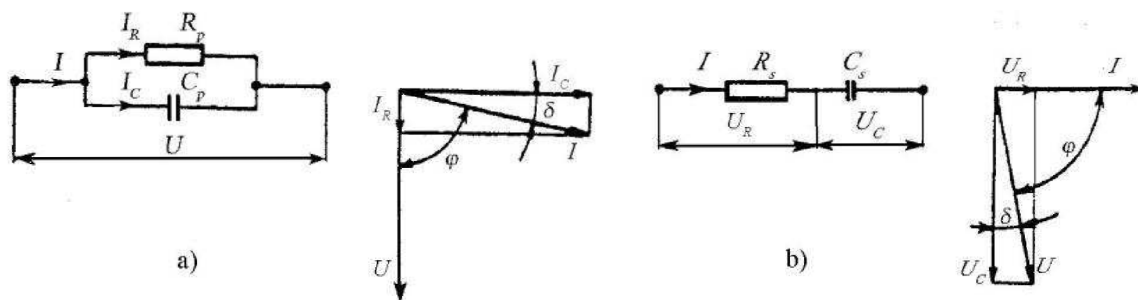
Ztrátový činitel a relativní permitivita jsou dva důležité materiálové parametry, pomocí nichž jsou látky (nevodiče) hodnoceny mezi sebou a vybírány pro různé aplikace.

Ztrátový činitel, neboli ztrátový úhel dielektrika, je veličina charakterizující izolant z hlediska jeho dielektrických ztrát. Pro harmonický průběh je dán poměrem činné a jalové složky proudu protékajícího kondenzátorem s tímto dielektrikem, tedy $\text{tg } \delta$, kde δ je ztrátový úhel dielektrika.

Dielektrické ztráty je proces, při kterém, za působení elektrického pole na izolant, dochází k přeměně elektrické energie na teplo. Energie přeměněná na teplo je ztrátová. Ztrátový činitel popisuje právě tento jev a proto požadujeme, aby jeho hodnota bylo co nejmenší. Za dobré izolační materiály lze označit takové, jejichž ztrátový činitel dosahuje hodnot menších než 10^{-3} .

Pro zjednodušení výpočtu lze ztrátové dielektrikum nahradit ekvivalentním zapojením složeným z bezeztrátových prvků a z prvků představujícími ztráty.

Lze použít zapojení sériové nebo paralelní (obr. 5), přičemž na volbě náhrady nezáleží. Důležitou podmínkou je, aby činný výkon a fázový úhel ztrátové soustavy byl ekvivalentní ztrátovému výkonu a fázovému úhlu ztrátového dielektrika.



Obrázek 5: Paralelní a sériové zapojení náhradního zapojení [10]

Vztahy platné pro náhradní zapojení:

a) paralelní zapojení

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (18)$$

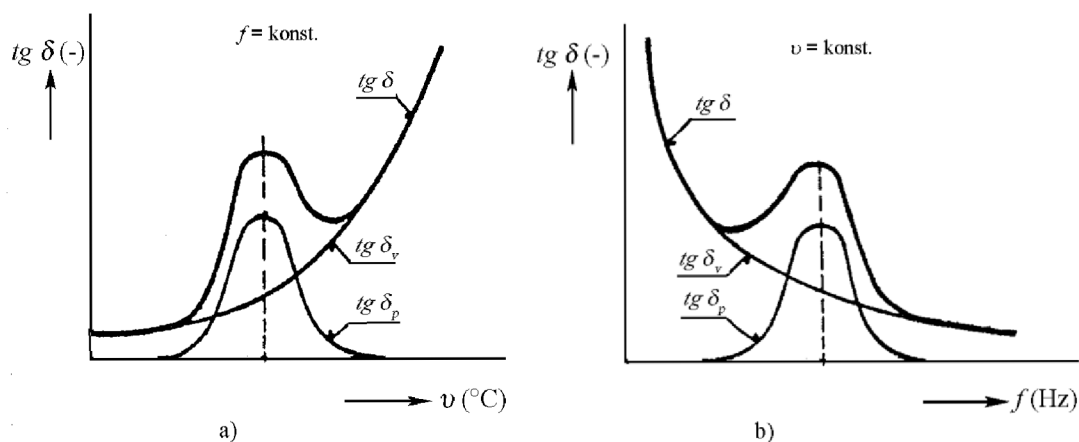
$$P_Z = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta \quad (19)$$

b) sériové zapojení

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_s C_s \quad (20)$$

$$P_Z = U^2 \omega C_s \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (21)$$

Ztrátový činitel je ovlivňován těmito faktory: teplotou, kmitočtem elektrického pole a u ferroelektrických materiálů i intenzitou elektrického pole.



Obrázek 6: a) kmitočtová závislost ztrátového činitele
b) teplotní závislost ztrátového činitele [10]

5.4. Komplexní permitivita

Permitivita je komplexní veličina označována jako ε^* . Skládá se tedy ze dvou složek:

a) ε' - reálná složka, závislá na kmitočtu. Představuje míru kapacitního charakteru dielektrika. Dělí se na:

- statickou permitivitu ε_S pro $f \rightarrow 0$
- optickou permitivitu ε_∞ pro $f \rightarrow \infty$

b) ε'' - ztrátové číslo = imaginární složka úměrná ztrátám v dielektriku

$$\varepsilon'' = \varepsilon' * \operatorname{tg} \delta \quad (22)$$

Komplexní permitivita je vyjádřena vztahem :

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (23)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' (1 - j \operatorname{tg} \delta) \quad (24)$$

Podle Debyeho teorie (uvažujeme pouze jednu relaxační dobu τ) lze také ε^* vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (25)$$

Takto vyjádřenou komplexní permitivitu, můžeme rozložit na reálnou a imaginární část:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega^2\tau^2} \quad (26)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) * \omega\tau}{1 + j\omega^2\tau^2} \quad (27)$$

Pro celkový ztrátový činitel pak bude platit:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) * \omega\tau}{\varepsilon_S + \varepsilon_\infty \omega^2\tau^2} \quad (28)$$

5.5. Relativní permitivita

Relativní permitivita, označována jako ϵ_r , je fyzikální veličina, která udává kolikrát je permitivita daného prostředí větší než je permitivita vakua ϵ_0 (materiálová konstanta = $8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$). Je to tedy bezrozměrná veličina.

Relativní permitivita byla definována M. Faradayem jako poměr kapacity C kondenzátoru vyplněného dielektrikem a kapacity C_0 stejného kondenzátoru vakuového.

Platí tedy:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad [-] \quad (29)$$

Relativní permitivita závisí na druhu dielektrika, na fyzikálních podmínkách (např. teplota a tlak) a také na kmitočtu (pokud je kondenzátor zapojen do obvodu se střídavým napětím).

Pro vakuum je její hodnota =1, u všech ostatních látek je $\epsilon_r > 1$. Neutrální kapalně izolanty nepřevyšují hodnotu $\epsilon_r = 1$. Dipólové kapalně izolanty, které mají velký dipólový moment molekul mají také velkou hodnotu ϵ_r (např. čistá voda $\epsilon_r = 80$).

6. Praktická část

6.1. Návrh elektrodového systému

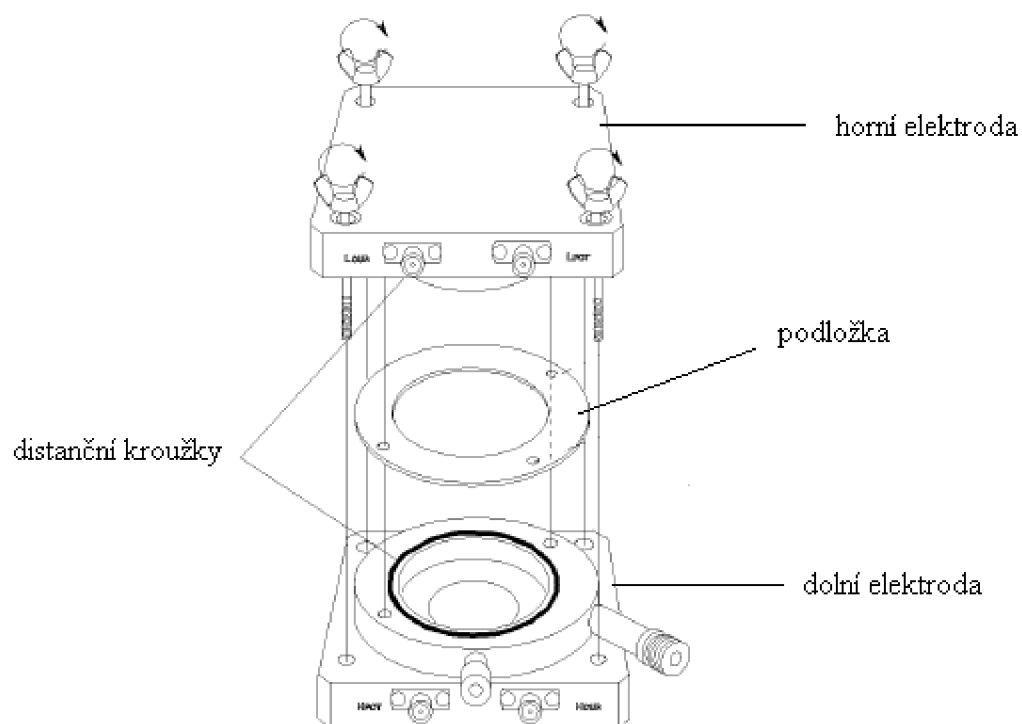
Pro měření elektrických vlastností vody byl navržen elektrodový systém, který se pomocí 4 vodičů připojí k měřicímu přístroji s označením Agilent 4284A (RLCG-metr). Tento měřicí přístroj umožňuje měření vzorků vody metodou dielektrické relaxační spektroskopie v časové i frekvenční oblasti (rozmezí kmitočtu od 20Hz do 20Mhz). Výsledkem měření je pak je získaná závislost komplexní permitivity ($\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$) na frekvenci a zpravidla i na dalších parametrech.

Části elektrodového systému:

- horní elektroda (průměr 38mm)
- dolní elektroda (průměr 38mm)
- distanční kroužky
- podložky – šířky 1,3; 1,5; 2 a 3 mm

Na obr.5 je znázorněno uspořádání elektrodového systému. Systém se skládá ze dvou elektrod, kde je každá elektricky odizolována a uzemněna. Mezi tyto elektrody se podle potřeby vkládají distanční kroužky a podložky příslušných šířek. V závislosti na šířkách podložek pak vzniká mezi elektrodami mezera (např. při použití podložky se šířkou 1,3mm budou elektrody od sebe vzdáleny 0,3mm).

Celková technická dokumentace výsledného systému je uvedena v příloze.



Obrázek 7: schéma uspořádání elektrodového systému [8]

6.2. Měřicí pracoviště

Použité přístroje (obr.8):

- 1 – PC s příslušenstvím
- 2 – RLCG – metr Agilent 4284A
- 3 – BNC kabely
- 4 – kapalinový termostat UH4
- 5 – nádoba vhodná pro ponoření elektrodového systému do olejové lázně (obr. 9)



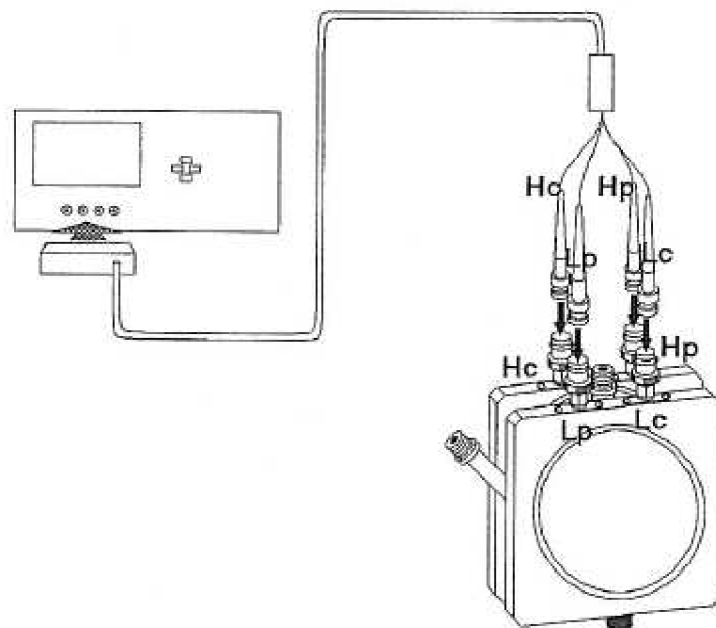
Obrázek 8: zapojení měřicího pracoviště



Obrázek 9: nádoba pro vkládání do olejové lázně

6.3. Měření permitivity a ztrátového činitele

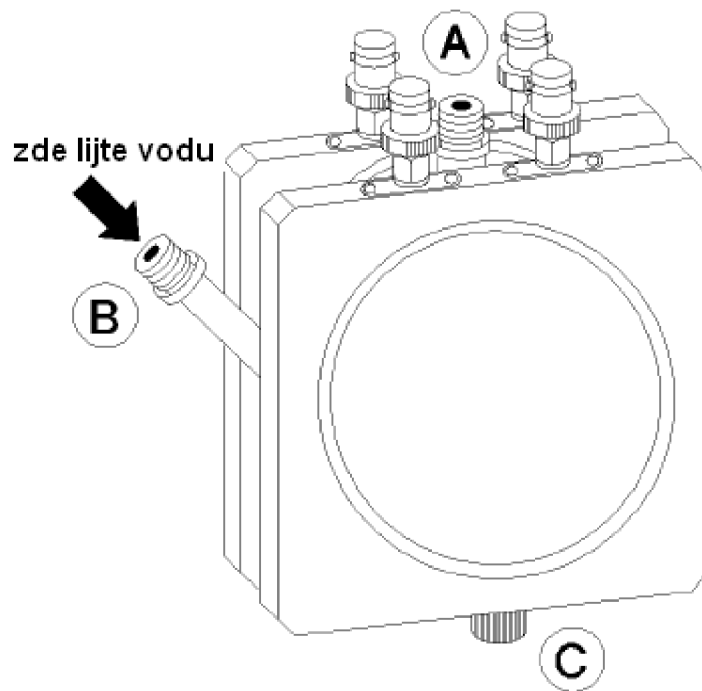
Měření se provádí pomocí elektrodového systému Agilent 16452 A a pomocí elektrodového systému vyrobeného FEKT připojeného 4 BNC kabely k RLCG metru Agilent 4284A (obr. 10). Tento RLCG metr umožňuje měření ve frekvenčním pásmu od 1Hz do 1Mhz. Naměřené hodnoty jsou odesílány do PC a zobrazovány a ukládány v programu Microsoft Excel.



Obrázek 10: propojení elektrodového systému s měřícím RLCG metrem [11]

Elektrodový systém Agilent se používá pro měření relativní permitivity a ztrátového činitele z materiálu, který je vložen mezi 2 paralelní elektrody. Pomocí distančních proužků, vkládaných mezi elektrody, se vytváří prostor pro materiál. Já jsem během svého měření používala distanční kroužky s velikostí 0,5mm a 2mm. Čímž jsem zvětšovala objem měřené kapaliny. Při použití kroužku s velikostí 0,5mm byl objem kapaliny vstříknuté do elektrodového systému 2ml. Při použití kroužku 2mm se objem zvětšil na 4ml kapaliny.

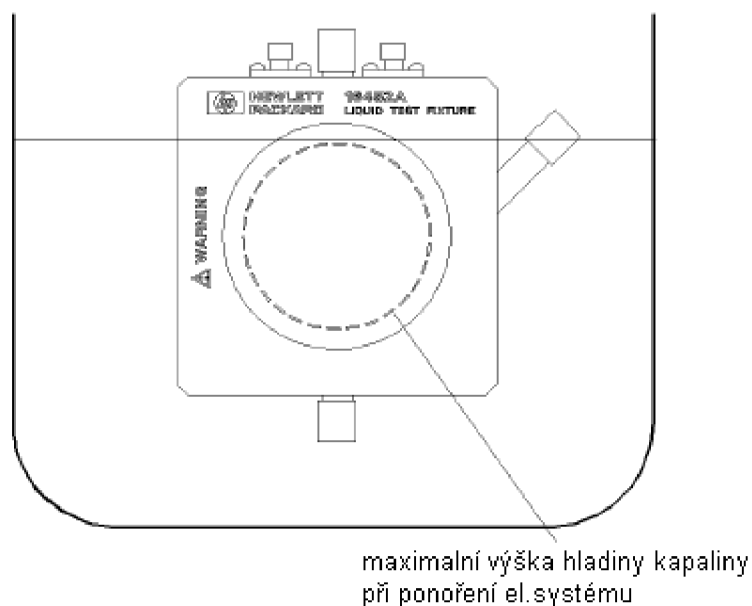
Na obr. 11 jsou znázorněny všechny vývody elektrodového systému. Kapalina se do něj vstříkuje pomocí injekční stříkačky – otvor B. Otvor A musí během měření zůstat otevřený. Vývod C je uzavřen těsnícím víčkem.



Obrázek 11: způsob plnění elektrodového systému kapalinou[11]

Elektrodový systém s kapalinou se poté vkládá do nádoby naplněné vodou (viz. obrázek 9), určené k ponoření do olejové lázně. Maximální výška hladiny vody v nádobě je dána výrobcem a na elektrodovém systému je označena ryskou (obr. 12). Takto připravený měřicí přípravek se vkládá do olejové lázně. Na termostatu UH4 se nastavuje požadovaná teplota. Olej předá teplo vodě v nádobě a ta elektrodovému systému, který je do ní ponořen. Přístroj umožňuje měřit v rozmezí teplot od -20°C do $+125^{\circ}\text{C}$. Jelikož měřený vzorek byla voda s bodem varu 100°C , bylo měřené rozmezí od 20°C do 90°C , kdy se již ve vodě začaly tvořit bubliny. Krok mezi jednotlivými teplotami byl 5°C . Po nastavení teploty na termostatu a jejím ustálení, jsem čekala 10 minut než se měřený vzorek dokonale prohřeje na požadovanou teplotu. Tato teplota byla pro jistotu zkontrolována ponořením rtuťového teploměru do vody napuštěné v nádobě.

Po odměření všech vzorků vody, byla změřena kapacita pro systém naplněný vzduchem. Postup během měření je stejný jako při měření vody. Pouze je jako dielektrikum použit vzduch. Tyto naměřené hodnoty poslouží pro výpočet relativní permitivity.



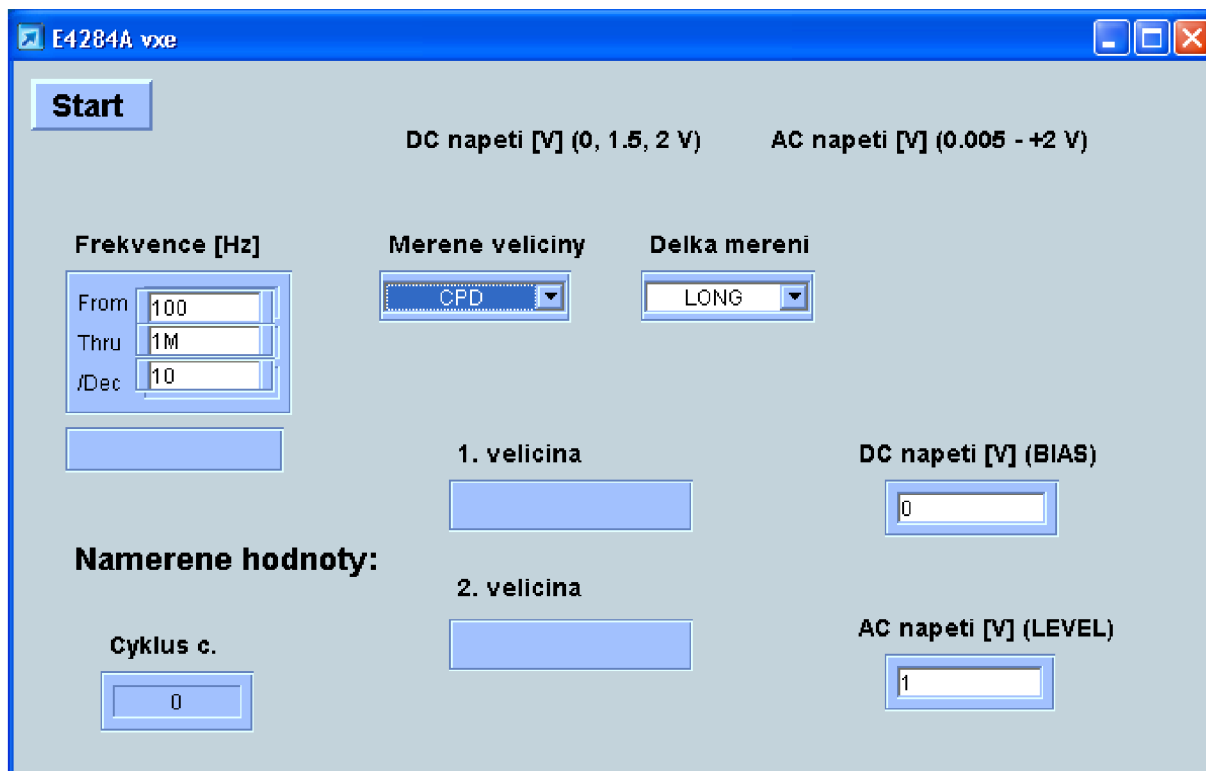
Obrázek 12: hloubka ponoření elektrodového systému v nádobě

Před každým měření se elektrodový systém musel rozebrat a pořádně vyčistit tak, aby nedocházelo k ovlivnění měřených výsledků. K čištění jsem používala isopropyl alkohol, kterým jsem nejen čistila elektrody ale také distanční kroužky. Po několikerém propláchnutí isopropyl alkoholem, jsem systém proplachovala deionizovanou vodou, tak abych měla jistotu, že veškeré nečistoty a zbytky alkoholu, byly z elektrod odstraněny.

Pro každý vzorek vody jsem používala zvláštní injekční stříkačku. Veškeré používané stříkačky a kádinky jsem měla pečlivě označené a uschované v laboratoři, tak aby je nemohl používat nikdo jiný. Před každým měřením byly deionizovanou vodou znovu vymyty i všechny kádinky.

6.3. Ukázka naměřených hodnot

Nastavení parametrů měření se provádí v programu s názvem E4284A (obr. 13). Zde jsem nastavila požadované frekvenční pásmo od 100Hz do 1MHz a zvolila měřené veličiny CPD (kapacita a ztrátový činitel). Po stisku tlačítka „start“ začalo samotné měření. Naměřené hodnoty se zobrazují pomocí tabulky a grafu v programu Microsoft Excel.



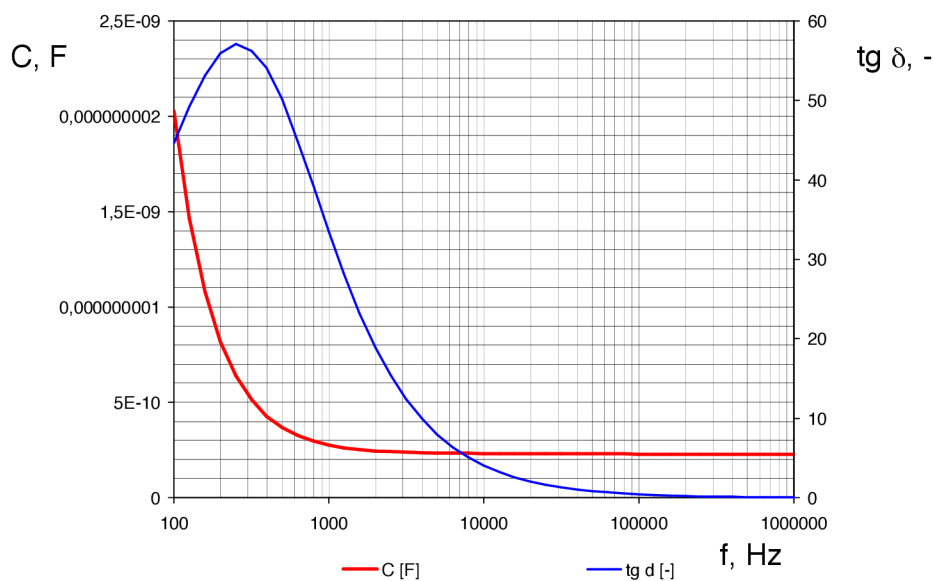
Obrázek 13: nastavení parametrů měření

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné naměřené hodnoty pro jeden použitý vzorek vody. V tomto případě se jednalo o vodu neionizovanou, která po dobu 10 minut prošla varem. V elektrodovém systému byl použit distanční kroužek s velikostí 2mm (mezera mezi elektrodami byla tedy 1mm).

Pro výpočet relativní permitivity je použit vzorec (29).

Tabulka 1: naměřené hodnoty pro deionizovanou vodu převařenou, podložka 2mm

č.měření	f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C0 [F]	εr[-]
1	100	2,21087E-09	43,94327	5,16E-12	4,29E+02
2	125,839	1,58902E-09	48,69007	4,99E-12	3,18E+02
3	158,562	1,16377E-09	52,86373	4,96E-12	2,35E+02
4	199,468	8,72476E-10	56,14757	4,92E-12	1,77E+02
5	251,046	6,74821E-10	57,77093	4,87E-12	1,39E+02
6	316,456	5,40261E-10	57,33083	4,82E-12	1,12E+02
7	398,089	4,42764E-10	55,69093	4,8E-12	9,21E+01
8	500	3,77856E-10	52,03067	4,79E-12	7,90E+01
9	631,313	3,32952E-10	46,8317	4,77E-12	6,98E+01
10	791,139	3,01477E-10	41,32673	4,75E-12	6,34E+01
11	1000	2,79098E-10	35,3584	4,75E-12	5,88E+01
12	1250	2,64543E-10	29,87353	4,73E-12	5,59E+01
13	1578,95	2,53807E-10	24,67377	4,73E-12	5,37E+01
14	2000	2,46172E-10	20,1018	4,72E-12	5,21E+01
15	2500	2,41324E-10	16,41797	4,72E-12	5,12E+01
16	3157,89	2,37751E-10	13,2034	4,71E-12	5,04E+01
17	4000	2,35237E-10	10,54328	4,71E-12	4,99E+01
18	5000	2,33599E-10	8,499387	4,71E-12	4,96E+01
19	6315,79	2,32421E-10	6,767603	4,71E-12	4,94E+01
20	7894,74	2,31605E-10	5,436847	4,7E-12	4,92E+01
21	10000	2,30994E-10	4,306587	4,7E-12	4,91E+01
22	12631,6	2,30576E-10	3,41803	4,7E-12	4,90E+01
23	15789,5	2,30258E-10	2,740327	4,7E-12	4,90E+01
24	20000	2,29998E-10	2,167727	4,7E-12	4,89E+01
25	25000	2,29758E-10	1,73764	4,7E-12	4,89E+01
26	31578,9	2,29544E-10	1,37829	4,7E-12	4,88E+01
27	40000	2,29344E-10	1,09027	4,7E-12	4,88E+01
28	50000	2,29171E-10	0,873967	4,7E-12	4,88E+01
29	62500	2,2903E-10	0,700487	4,7E-12	4,87E+01
30	80000	2,28891E-10	0,548291	4,7E-12	4,87E+01
31	100000	2,28769E-10	0,439338	4,7E-12	4,87E+01
32	125000	2,28672E-10	0,352008	4,7E-12	4,87E+01
33	160000	2,28592E-10	0,275421	4,7E-12	4,87E+01
34	200000	2,28534E-10	0,22059	4,7E-12	4,87E+01
35	250000	2,28483E-10	0,176695	4,7E-12	4,87E+01
36	320000	2,2843E-10	0,138353	4,7E-12	4,86E+01
37	400000	2,28424E-10	0,110767	4,7E-12	4,86E+01
38	500000	2,2841E-10	0,088696	4,7E-12	4,86E+01
39	640000	2,28393E-10	0,069424	4,7E-12	4,86E+01
40	800000	2,28371E-10	0,055703	4,7E-12	4,86E+01
41	1000000	2,2838E-10	0,044717	4,7E-12	4,86E+01



Obrázek 14: graf závislosti ztrátového činitele a kapacity na frekvenci

6.4. Zpracování naměřených a vypočtených hodnot

Během svého měření jsem pracovala se dvěma vzorky vody. Používala jsem vodu deionizovanou a pitnou vodu, určenou pro běžné účely (voda byla odebrána z kohoutku přímo v laboratoři). Oba vzorky vod byly proměřeny pro distanční kroužky (podložky) 0,5mm a 2mm. Poté jsem vody po dobu 10 minut nechala projít varem a měření jsem opakovala.

Pro každou teplotu bylo měření provedeno 3x. Prodleva mezi jednotlivými měřeními byla 2 minuty. Z těchto hodnot jsem vypočítala aritmetický průměr. Ve vyhodnocování jsem pak používala tyto zprůměrované hodnoty. Pro každou teplotu byly provedeno měření pro celkem 41 frekvencí. Pro přehlednost jsou v následujících tabulkách a grafech zobrazeny pouze vybrané hodnoty.

Vzorce použité ve výpočtech:

Poměrová polarizace P_m , vyjádřena z Claus-Mossotiho rovnice:

$$P_m = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon_r + 2} \quad [-] \quad (30)$$

Polarizovatelnost α (schopnost polarizace vlastního dielektrika):

$$\alpha = \frac{P_m * 3 * \varepsilon_0}{n} \quad [F * m^2] \quad (31)$$

kde n = koncentrace polárních částic, vypočtená ze vztahu:

$$n = \frac{N_A * \rho}{M} \quad [m^{-3}] \quad (32)$$

N_A =Avogadrova konstanta $6,02214 * 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, ρ = hustota vody $999,97 \text{ Kg/ m}^{-3}$

M = molární hmotnost vody $0,01801528 \text{ Kg/mol}$, ε_0 = permitivita vakua $8,854 * 10^{-12} \text{ F/m}$

Molární polarizace PM :

$$PM = \frac{N_A * \alpha}{3 * \varepsilon_0} \quad [m^3/mol] \quad (33)$$

6.4.1. Deionizovaná voda

Laboratorní podmínky během měření: teplota vzduchu $28,8^\circ\text{C}$
vlhkost 26%
atmosférický tlak 993,3hPa

Tabulka 2: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm

$\varepsilon_r[-]$		f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
t[°C]	20	138	71,7	44	37,9	35,8	35	34,8	34,7	34,7
	30	232	101	49,9	38,7	34,7	33,1	32,7	32,5	32,5
	40	445	179	72,1	49,1	41	37,8	37,1	36,8	36,7
	50	864	314	105	60,9	45,7	39,6	38,3	37,6	37,4
	60	1310	467	14	72,1	48,6	39,2	37,1	36,1	36
	70	1660	600	174	83,8	52,3	39,3	36,4	34,8	34,7
	80	2530	900	248	109	60,3	40,4	36	33,5	33,4
	90	4410	1550	405	162	78,4	44,4	36,7	32,6	32,4

Tabulka 3: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

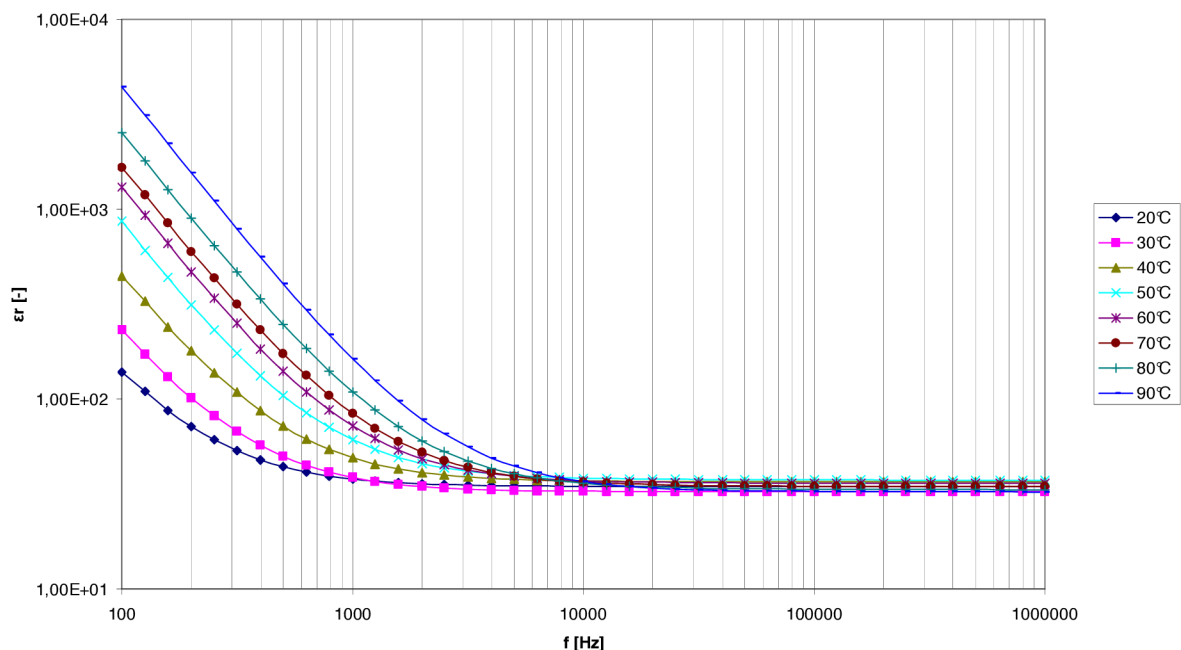
$\epsilon_r[-]$		f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
t[°C]	20	1068,029	381,99	129,57	80,35	64,48	58,62	57,59	56,91	56,87
	30	2821,62	92,96	236,29	111,19	72,39	58,61	55,99	54,8	54,72
	40	5402,37	1710,81	400,36	159,59	85,26	58,68	53,59	51,2	51,12
	50	848,23	2653,73	591,29	214,22	99,06	58,4	50,7	47,13	46,97
	60	12108,62	3868,66	853,23	292,9	120,48	59,01	47,31	41,82	41,57
	70	25095	8236,8	1818,8	594,87	215,22	80,22	54,47	42,96	42,12
	80	46488,27	15622,87	3522,19	136,87	386,133	118,45	67,63	43,96	43,34
	90	93113	32119	7459,72	2410,16	785,4	202,59	93,03	43,78	42,62

V tabulce 2 jsou zapsány naměřené hodnoty pro měření se vzdáleností elektrod 2mm.

Je názorně vidět, jak relativní permitivity se vzrůstající teplotou rostou. Při zvyšování frekvence, jejich hodnota naopak klesá. Od frekvencí cca 10kHz a výše je již hodnota relativní permitivity téměř nemění. Hodnoty se pak pohybují v rozmezí 32 – 36. Nedochozí zde k takovým velkým rozdílům jako u frekvencí nižších. Průběh je znázorněn v grafu na obrázku 15.

V tabulce 3 jsou hodnoty pro měření s podložkou tloušťky 0,5mm. Průběhy hodnot jsou stejné jako u předešlého měření, pouze se liší řádově. Hodnoty při nižších frekvencích jsou vyšší o 1 řád. Zatímco u vzdálenosti elektrod 2mm byla naměřena největší hodnota relativní permitivity 4410 (pro 90°C), u vzdálenosti 0,5mm byla pro stejnou teplotu nejvyšší naměřená hodnota relativní permitivity 93113. K ustálení hodnot došlo také u frekvence 10kHz. Poté se hodnoty relativní permitivity již pohybovaly v rozmezí 42 – 57.

Závislost relativní permitivity na frekvenci



Obrázek 15: graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty, vzdálenost elektrod 2mm

Tabulka 4: ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm

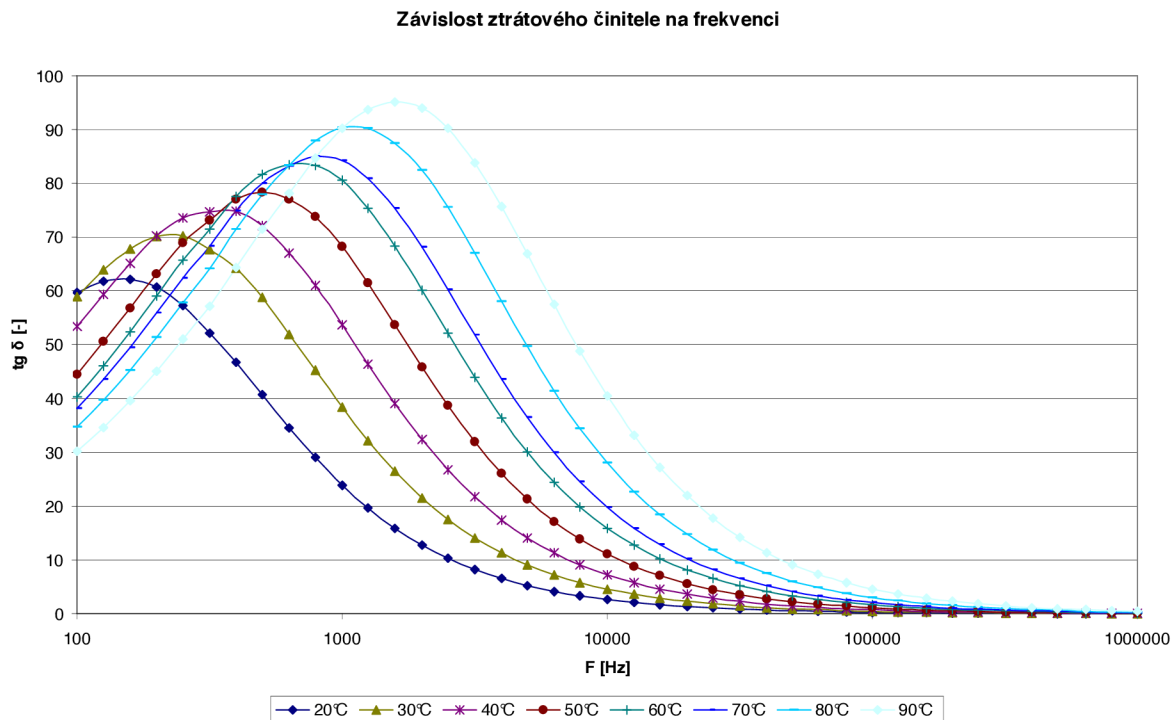
tg δ [-]	t [°C]	f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
	20	59,6635	60,67	40,71	23,897	12,73	5,24	2,63	0,266	0,18
	30	58,93	70,18	58,79	38,37	21,54	9,08	4,59	0,46	0,039
	40	53,36	70,2	72,1	53,67	32,36	14,1	7,214	0,73	0,066
	50	44,52	63,18	78,37	68,31	45,86	21,3	11,04	1,13	0,102
	60	40,24	59,06	81,65	80,52	60,21	30,099	15,92	1,64	0,148
	70	38,16	55,93	80	84,26	68,14	36,53	19,78	2,08	0,21
	80	34,74	51,44	77,95	90,33	82,42	49,68	28,039	3,03	0,3
	90	30,18	45,1	71,49	90,25	94,05	66,93	40,54	4,59	0,464

Tabulka 5: ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

tg δ [-]	t [°C]	f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
	20	25,2	39,48	43,58	35,47	22,26	9,85	5,04	0,514	0,052
	30	18,89	30,08	47,46	50,84	39,25	19,47	10,1	1,047	0,105
	40	5,35	25,03	43,7	55,36	52,09	30,4	16,68	1,75	0,176
	50	12,9	21,19	38,96	54,25	58,99	40,19	23,19	2,5	0,252
	60	10,92	17,79	33,15	48,78	59,67	48,91	30,56	3,46	0,35
	70	8,45	13,53	25,36	39,3	54,75	59,1	43,65	5,64	0,57
	80	7	11,2	20,7	32,58	48,43	63,59	55,88	8,65	0,88
	90	5,53	8,59	15,58	24,62	38,24	59,81	65,37	13,97	1,44

V tabulce 4 jsou zaznamenány hodnoty ztrátového činitele pro jednotlivé teploty a k nim příslušné frekvence – měření pro vzdálenost elektrod 2mm. Průběhy jsou lépe patrné z obrázku 16. Je zřejmé, že se maxima ztrátového činitele se vzrůstající teplotou posouvají k vyšším kmitočetům. Pro frekvence vyšší jako 100kHz je již hodnoty téměř neliší.

Ztrátový činitel při měření se vzdáleností elektrod 0,5mm má nižší hodnoty. Maxima jsou pak více posunuta k vyšší frekvencím.



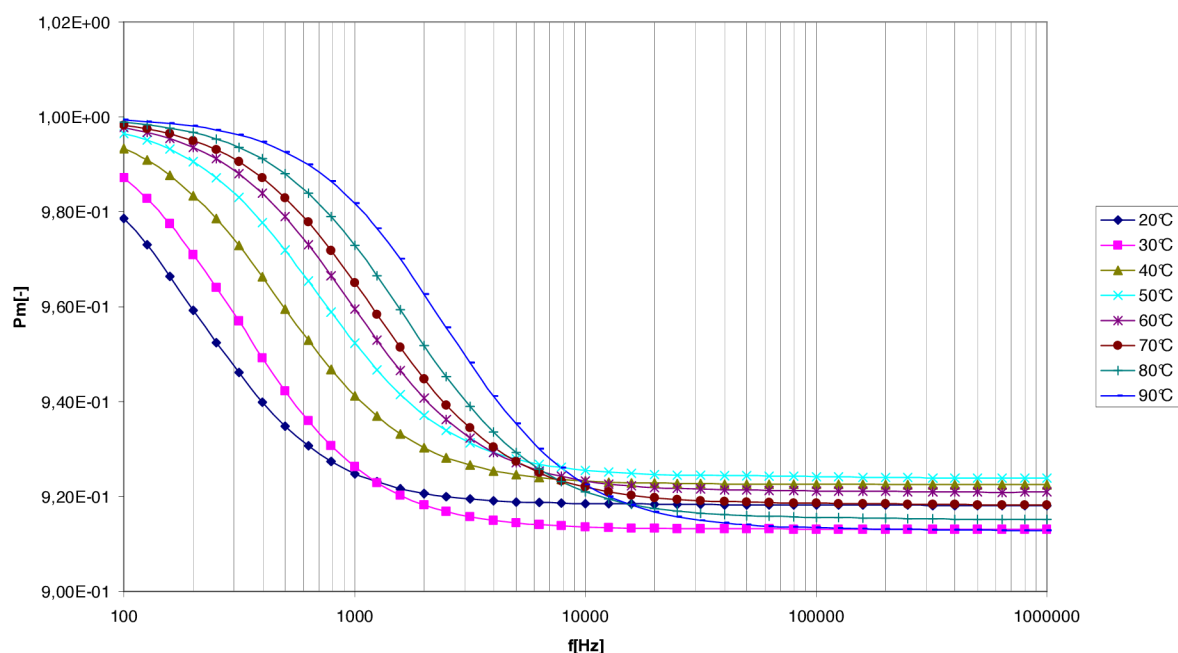
Obrázek 16: graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty, vzdálenost elektrod 2mm

V tabulce 6 je zaznamenán průběh poměrové polarizace. Hodnoty se liší jen řádech setin. Pro lepší představu o jejich změnách je proto vhodnější obrázek 17, kde jsou jednotlivé průběhy vykresleny. Z průběhu je patrné, že hodnoty poměrové polarizace se zvyšující se frekvencí klesají až do hodnot kolem 10kHz. V tomto bodě dochází k ustálení hodnot a pro vyšší frekvence již zůstává téměř konstantní.

Tabulka 6: změna poměrové polarizace pro vzrůstající teploty a frekvence, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm

Pm[-]	t[°C]	f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
	20	0,979	0,959	0,935	0,925	0,921	0,919	0,919	0,918	0,918
	30	0,987	0,971	0,942	0,926	0,918	0,918	0,914	0,914	0,913
	40	0,993	0,983	0,96	0,941	0,93	0,925	0,923	0,923	0,923
	50	0,997	0,991	0,972	0,952	0,937	0,928	0,926	0,924	0,924
	60	0,997	0,994	0,979	0,96	0,941	0,927	0,923	0,921	0,921
	70	0,998	0,995	0,983	0,965	0,945	0,927	0,922	0,919	0,918
	80	0,999	0,997	0,988	0,973	0,952	0,929	0,921	0,916	0,915
	90	0,999	0,998	0,993	0,982	0,963	0,935	0,923	0,913	0,913

Závislost poměrové polarizace na frekvenci



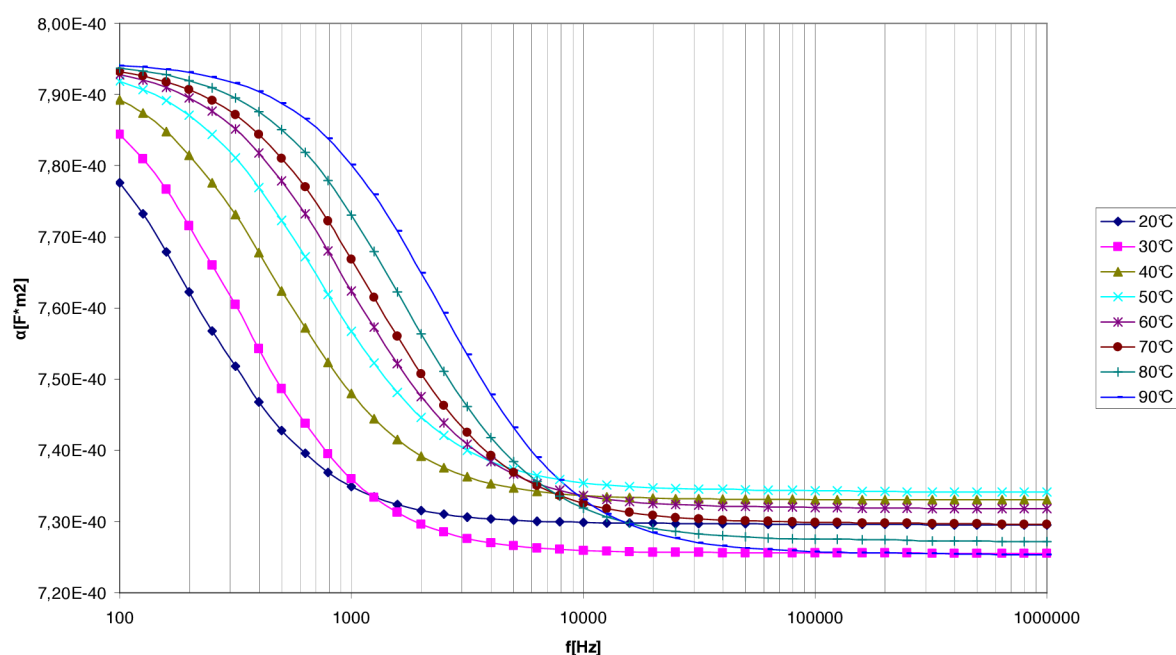
Obrázek 17: graf závislosti poměrové polarizace na frekvenci pro různé teploty, podložka 2mm

V tabulce 7 a na obrázku 18 jsou znázorněny změny polarizovatelnosti. Z grafů je patrné, že se minima se vzrůstající teplotou posouvají k vyšším frekvencím a zároveň se jejich hodnota snižuje.

Tabulka 7: Polarizovatelnost při vzrůstající teplotě a frekvenci, deionizovaná voda, podložka 2mm

α [F*m2]	t [°C]	f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
	20	7,78E-40	7,62E-40	7,43E-40	7,35E-40	7,32E-40	7,30E-40	7,30E-40	7,30E-40	7,30E-40
	30	7,84E-40	7,72E-40	7,49E-40	7,36E-40	7,27E-40	7,26E-40	7,26E-40	7,26E-40	7,26E-40
	40	7,89E-40	7,81E-40	7,62E-40	7,48E-40	7,39E-40	7,35E-40	7,34E-40	7,33E-40	7,33E-40
	50	7,92E-40	7,87E-40	7,72E-40	7,57E-40	7,45E-40	7,37E-40	7,35E-40	7,34E-40	7,34E-40
	60	7,93E-40	7,90E-40	7,78E-40	7,62E-40	7,48E-40	7,37E-40	7,34E-40	7,32E-40	7,32E-40
	70	7,93E-40	7,91E-40	7,81E-40	7,67E-40	7,37E-40	7,33E-40	7,30E-40	7,30E-40	7,30E-40
	80	7,94E-40	7,92E-40	7,85E-40	7,73E-40	7,56E-40	7,838E-40	7,32E-40	7,28E-40	7,27E-40
	90	7,94E-40	7,93E-40	7,89E-40	7,80E-40	7,65E-40	7,43E-40	7,33E-40	7,26E-40	7,26E-40

Závislost polarizovatelnosti na frekvenci



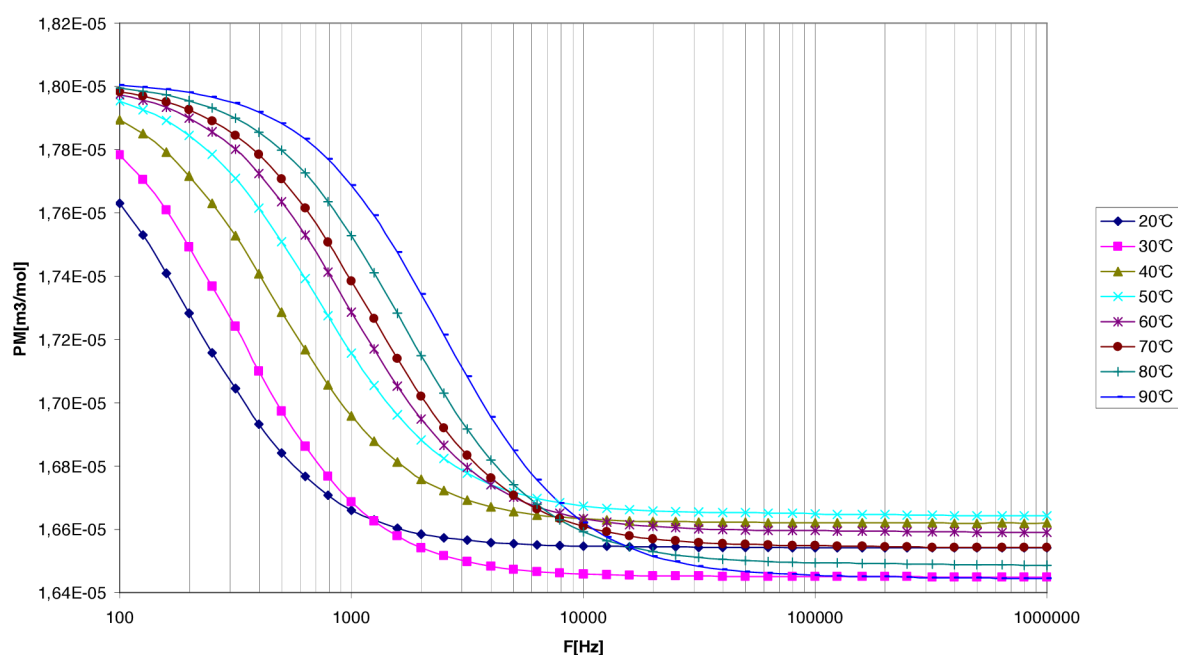
Obrázek 18: graf závislost polarizovatelnosti na frekvenci pro různé teploty, vzdálenost elektrod 2mm

V tabulce 8 a na obrázku 19 jsou zobrazeny změny v průběhu molární polarizace pro jednotlivé teploty a frekvence. Hodnoty se příliš nemění. Pro frekvence 10kHz a vyšší jsou již hodnota konstantní.

Tabulka 8: Molární polarizace pro vzrůstající teploty a frekvence, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm

PM[m3/mol]	t[°C]	f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
	20	1,76E-05	1,73E-05	1,68E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,65E-05
	30	1,78E-05	1,75E-05	1,70E-05	1,70E-05	1,65E-05	1,65E-05	1,66E-05	1,66E-05	1,66E-05
	40	1,79E-05	1,77E-05	1,73E-05	1,70E-05	1,68E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,66E-05
	50	1,80E-05	1,78E-05	1,75E-05	1,72E-05	1,69E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,66E-05	1,66E-05
	60	1,80E-05	1,79E-05	1,76E-05	1,73E-05	1,69E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,65E-05	1,65E-05
	70	1,80E-05	1,79E-05	1,77E-05	1,74E-05	1,70E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,65E-05	1,65E-05
	80	1,80E-05	1,80E-05	1,78E-05	1,78E-05	1,67E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,65E-05	1,65E-05
	90	1,80E-05	1,80E-05	1,79E-05	1,79E-05	1,68E-05	1,67E-05	1,66E-05	1,65E-05	1,65E-05

Závislost molární polarizace na frekvenci



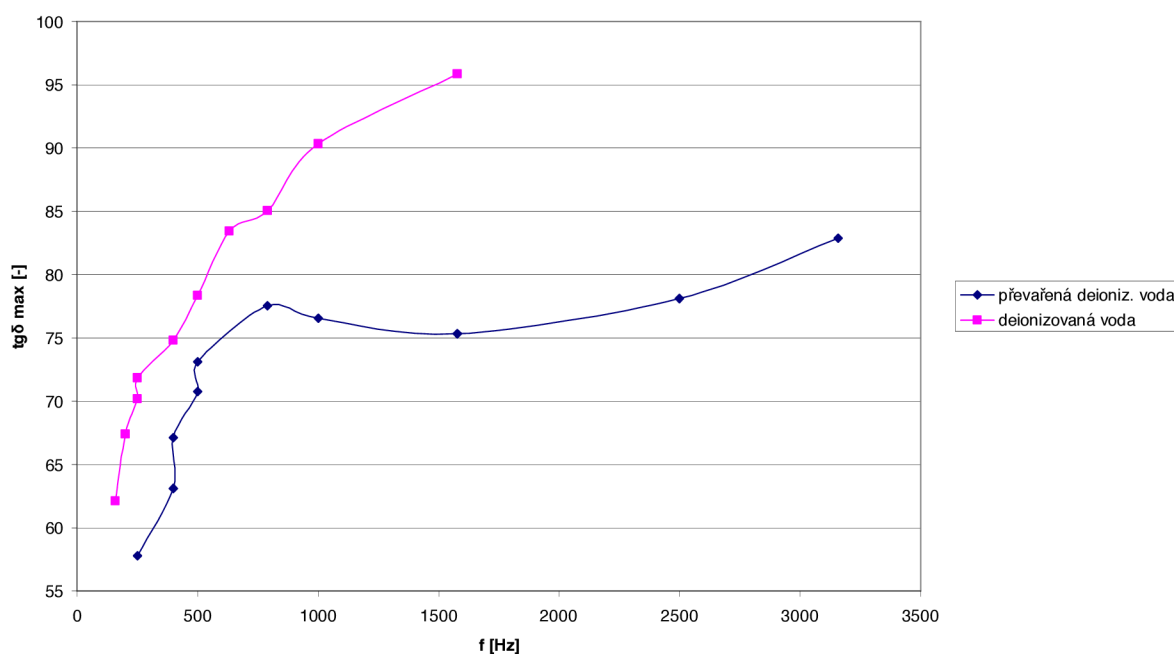
Obrázek 19: graf závislosti změny molární polarizace na frekvenci

V tabulce 9 jsou vypsány maximální naměřené hodnoty ztrátového činitele pro deionizovanou vodu (neupravenou) a pro deionizovanou vodu, kterou jsem převařila po dobu 10 minut. V grafu na obrázku 20 je vidět, jaký mělo převaření vliv na celkové vlastnosti vody. Ztrátový činitel deionizované vody, která neprošla varem, dosahoval maximálních hodnot při nižších frekvencích než tomu bylo u vody převařené. Zatímco u neupravené vody $\text{tg } \delta$ s vyššími teplotami prudce roste (při 90°C je max. hodnota 95,86 pro frekvenci 1578Hz), tak u vody převařené jeho hodnoty rostly pozvolna. Nejvyšší hodnota zde byla naměřena 82,86 pro frekvenci 3157Hz.

Tabulka 9: max. hodnoty ztrátového činitele, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm

deionizovaná voda			deioniz. voda - převařená		
t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]	t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]
20	62,126	158,562	20	57,77093	251,041
25	67,42	199,468	25	63,0999	398,089
30	70,2012	251,046	30	67,14	398,089
35	71,85	251,046	35	70,77	500
40	74,83	398,089	40	73,09	500
50	78,37	500	50	77,54	791,139
60	83,44	631,313	60	76,55	1000
70	85,059	791,139	70	75,345	1578,95
80	90,33	1000	80	78,09	2500
90	95,86	1578,95	90	82,86	3157,89

Závislost maximální hodnoty tg δ na frekvenci



Obrázek 20: porovnání průběhu změny hodnot tg δ max. pro 2 vzorky deionizované vody, vzdálenost elektrod 2mm

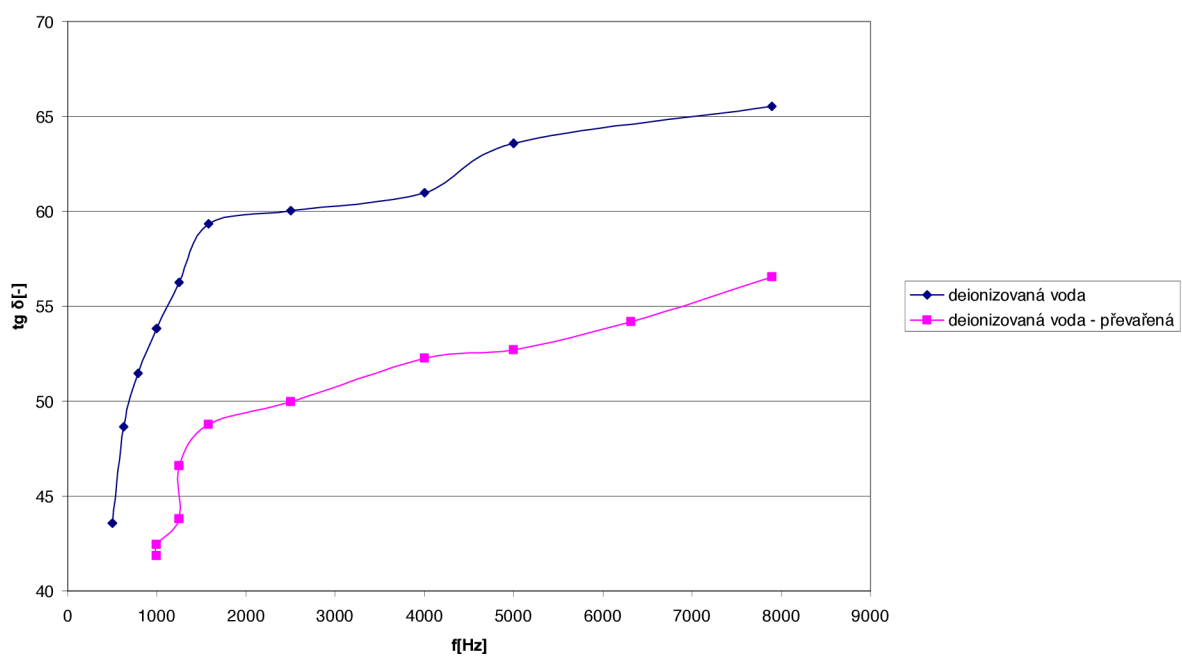
V tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty změny maximálních hodnot ztrátového činitele pro měření s podložkou 0,5mm. Grafické znázornění je zobrazeno na obrázku 21 (průběhy pro ztrátové činitele a permitivity pro podložku 0,5mm jsou uvedeny v příloze).

Na obrázku 22 jsou pro porovnání vykresleny všechny křivky naměřených maximálních hodnot ztrátového činitele. Z výsledků je patrné, že při použití podložky o velikosti 0,5mm jsou hodnoty ztrátového činitele nižší a jejich nárůst je pozvolný. Kdežto u podložky 2mm dosahují jsou hodnoty ztrátového činitele vyšší pro nižší frekvence.

Tabulka 10: maximální hodnoty ztrátového činitele, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

deionizovaná voda			deioniz. voda - převařená		
t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]	t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]
20	43,58	500	20	41,84	1000
25	48,65	631,313	25	42,46	1000
30	51,47	791,139	30	43,81	1250
35	53,84	1000	35	46,59	1250
40	56,25	1250	40	48,78	1578,95
50	59,35	1578,95	50	49,97	2500
60	60,02	2500	60	52,25	4000
70	60,98	4000	70	52,71	5000
80	63,59	5000	80	54,17	6315,79
90	65,53	7894,74	90	56,54	7894,74

Změna maximálních hodnot ztrátového činitele



Obrázek 21: porovnání průběhu změny hodnot tg δ max. pro 2 vzorky deionizované vody, vzdálenost elektrod 0,5mm

Tabulka 11: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

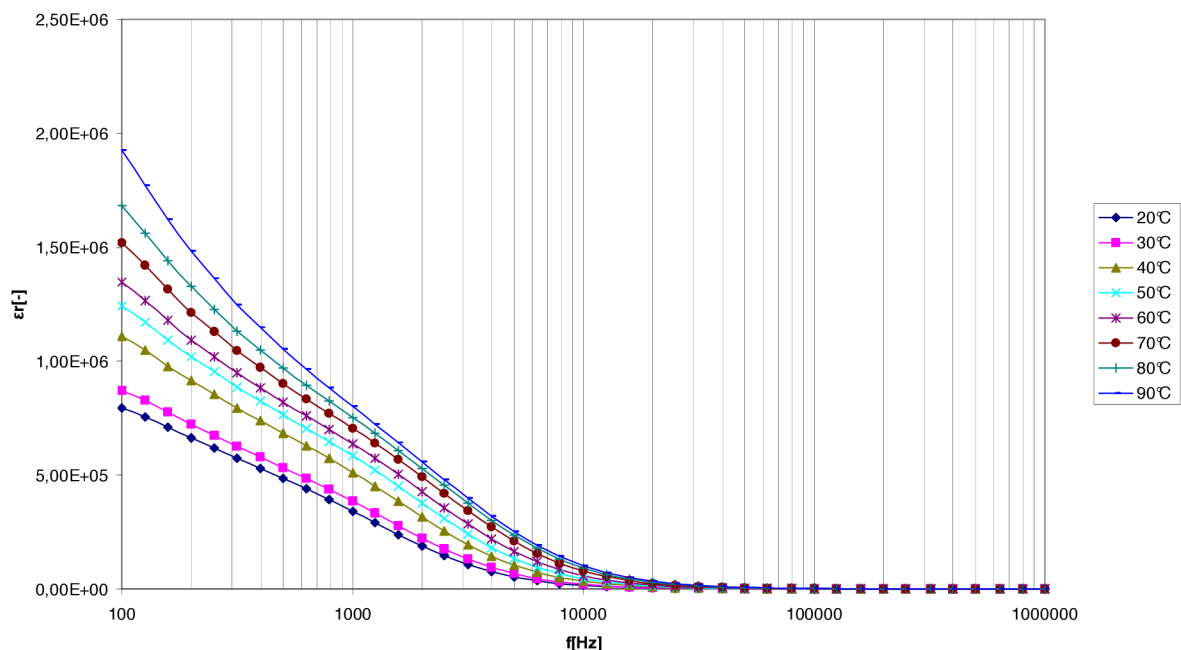
$\epsilon_r[-]$		f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
$t[^\circ\text{C}]$	20	794000	663000	485000	342000	189000	53300	16200	313	81
	30	871000	723000	533000	384000	222000	66900	20800	380	81,4
	40	1110000	913000	684000	512000	316000	104000	33700	580	94,4
	50	1240000	1020000	766000	584000	377000	134000	45100	760	96,6
	60	1350000	1090000	822000	636000	428000	165000	58300	983	97
	70	1520000	1210000	902000	705000	493000	211000	79300	1370	97
	80	1680000	1330000	969000	753000	530000	237000	92600	1650	96
90	1930000	1480000	1050000	801000	558000	253000	102000	1930	92	

Tabulka 12: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 2mm

$\epsilon_r[-]$		f [Hz]								
		100	200	500	1000	2000	5000	10000	100000	1000000
$t[^\circ\text{C}]$	20	888937	657988	335109	153054	54853	11346	3280	104,09	43,78
	30	927243	667061	339528	157495	57487	19666	3507	105,4	40,77
	40	1203599	893184	481119	236595	90627	28043	5724	144,95	46
	50	1458199	1053151	589157	305908	123815	28043	8244	183,23	46,33
	60	1585636	1157313	660792	353715	148631	34841	10370	217,4	46,87
	70	1820762	1321548	755844	417187	183021	44934	13621	271,59	47,77
	80	2061261	1453793	825515	464004	211979	54843	17040	331,72	47,49
	90	2386404	1634729	887596	492922	227149	60543	19191	376,5	47,04

Relativní permitivita pro pitnou vodu dosahuje mnohem vyšších hodnot než je tomu u vody deionizované. Celkově o 3 řády. Nejvyšší hodnota relativní permitivity pro pitnou vodu se pohybuje v řádech milionů. Zatímco u vody deionizované jsou to řádově tisíce. U pitné vody relativní permitivita s rostoucím kmitočtem klesá až do hodnoty kolem 100kHz. Poté se již hodnoty ustálí a pohybují se pak kolem 90. U vody deionizované hodnoty klesají pouze do kmitočtu cca 10kHz. Poté dojde k ustálení a hodnoty se dále již výrazně nemění. Pro podložku 0,5mm jsou relativní permitivity nižší než pro podložku 2mm. Průběhy však zůstávají stejné. Průběhy pro podložku 0,5mm jsou vykresleny v grafu na obrázku 23.

Závislost relativní permitivity na frekvenci



Obrázek 23: graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Maxima ztrátového činitele pro pitnou vodu jsou posunuta do oblastí vysokých frekvencí, zatímco v nižších frekvencích se jeho hodnoty příliš nemění. Zlom nastává v okolí frekvence 10kHz, kdy dochází k prudkému nárůstu. U vody deonizované naopak již v této oblasti zůstávaly hodnoty konstantní.

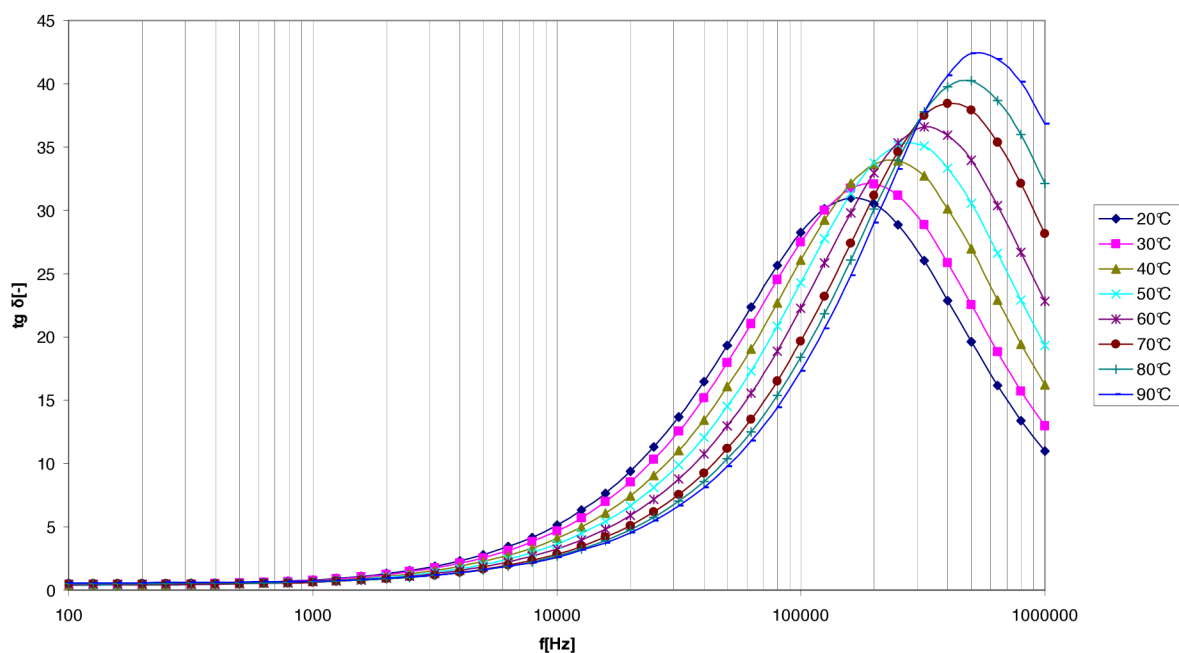
Tabulka 13: ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 2mm

tg δ [-]	t [°C]	f [Hz]								
		100	1000	10000	100000	160000	200000	250000	500000	1000000
	20	0,662	2	12,92	41,7	38,01	34,63	30,71	18,55	9,99
	30	0,7	2	12,55	42,88	40,12	37	33,16	20,52	11,19
	40	0,7	1,8	11,1	45,14	45,23	42,9	39,5	25,76	14,35
	50	0,7	1,65	9,77	45,45	48,67	47,7	45,21	31,5	18,13
	60	0,73	1,58	8,98	44,47	49,64	49,69	48,08	35,3	20,82
	70	0,76	1,53	8,16	42,81	50,06	51,41	51,04	40,13	24,57
	80	0,8	1,53	7,52	40,7	49,45	51,97	52,94	44,8	28,7
	90	0,84	1,6	7,3	39,34	48,77	51,96	53,72	47,87	31,8

Tabulka 14: ztrátový čísel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

tg δ [-]	t [°C]	f [Hz]								
		100	1000	10000	100000	160000	200000	250000	500000	1000000
	20	0,395	0,8	5,13	28,25	31	30,49	28,85	19,61	11
	30	0,416	0,76	4,67	27,52	31,76	32,08	31,15	22,53	12,98
	40	0,43	0,702	4,08	26,06	32,11	33,65	33,91	26,95	16,2
	50	0,449	0,669	3,65	24,29	31,32	33,78	35,38	30,56	19,33
	60	0,475	0,64	3,26	22,25	29,8	32,98	35,71	33,94	22,83
	70	0,514	0,63	2,84	19,68	27,41	31,2	34,6	37,9	27,18
	80	0,541	0,65	2,68	18,38	26,065	30,09	33,98	40,24	32,13
	90	0,565	0,719	2,61	17,33	24,87	29,01	33,27	42,38	36,84

Závislost ztrátového čísel na frekvenci

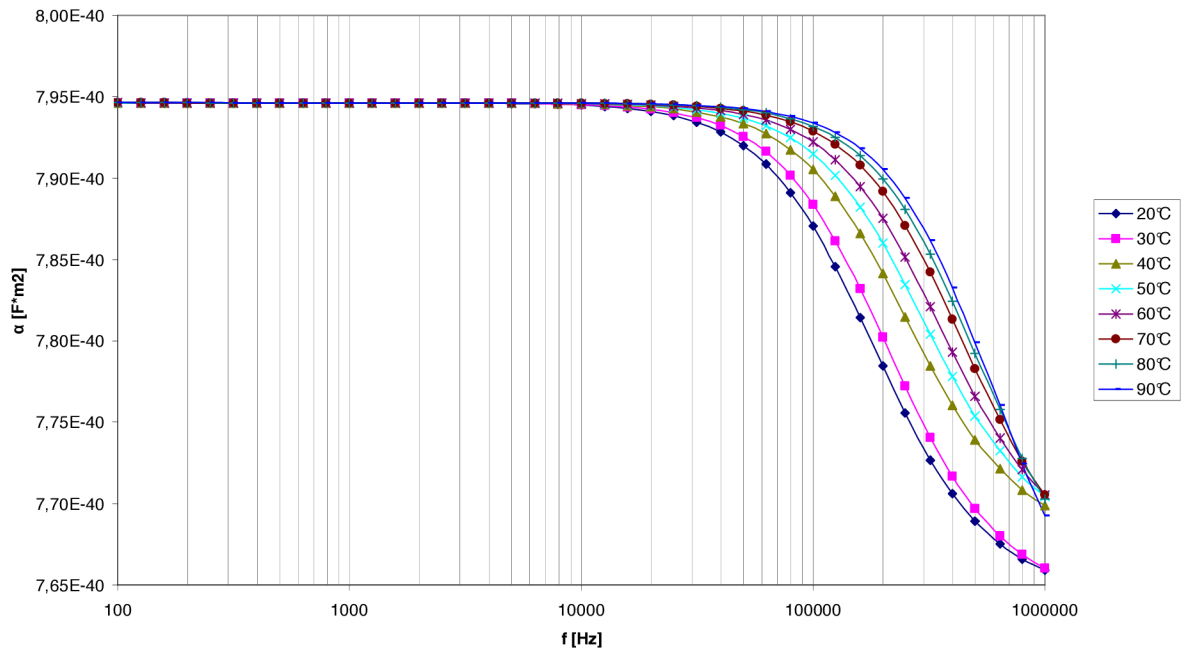


Obrázek 24: graf závislosti ztrátového čísel na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Hodnoty polarizovatelnosti, poměrové polarizace a molární polarizace se lišily jen v řádech setin. Z tohoto důvodu jsou zde pro názornost uvedeny pouze grafické závislosti (obrázky 25, 26, 27).

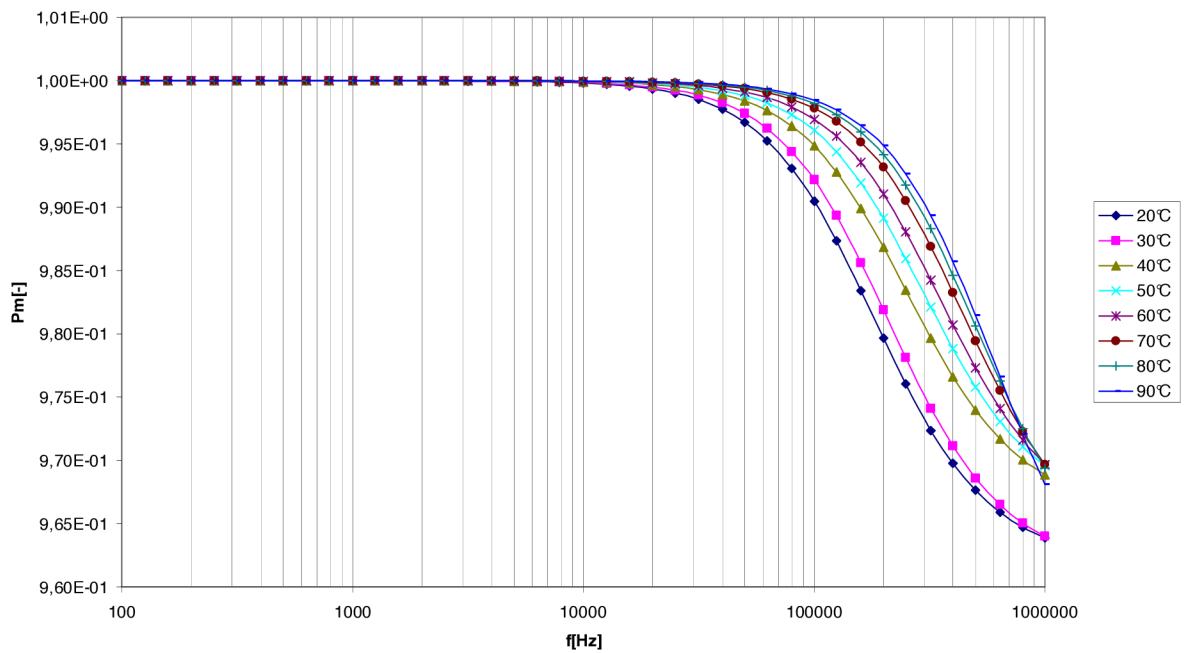
Všechny 3 veličiny mají u pitné vody podobný průběh, jako u vody deionizované. U deionizované vody hodnoty postupně klesají až do oblasti frekvencí 10kHz, poté jsou již téměř konstantní. U pitné vody také hodnoty postupně klesají ale až za hranicí 10kHz. Do této frekvence si drží své maximální hodnoty. Minimálních hodnot pak dosahují v oblasti velmi vysokých kmitočtů.

Závislost polarizovatelnosti na frekvenci



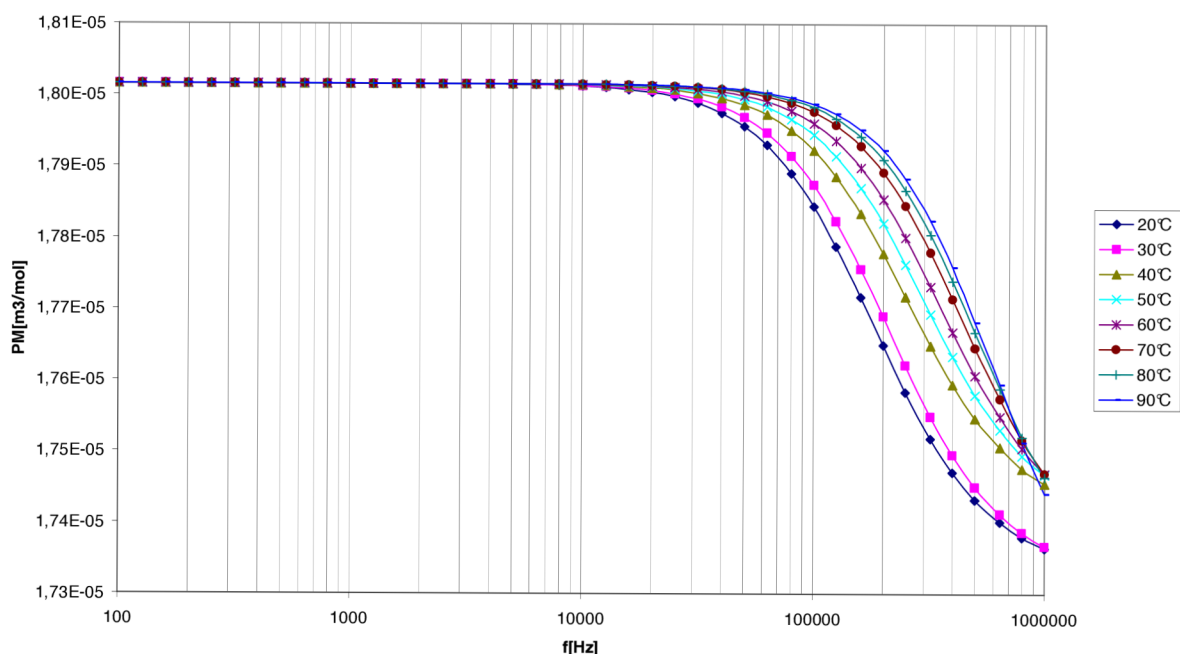
Obrázek 25: změna polarizovatelnosti pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Závislost poměrové polarizace na frekvenci



Obrázek 26: poměrová polarizace pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Závislost molární polarizace na frekvenci



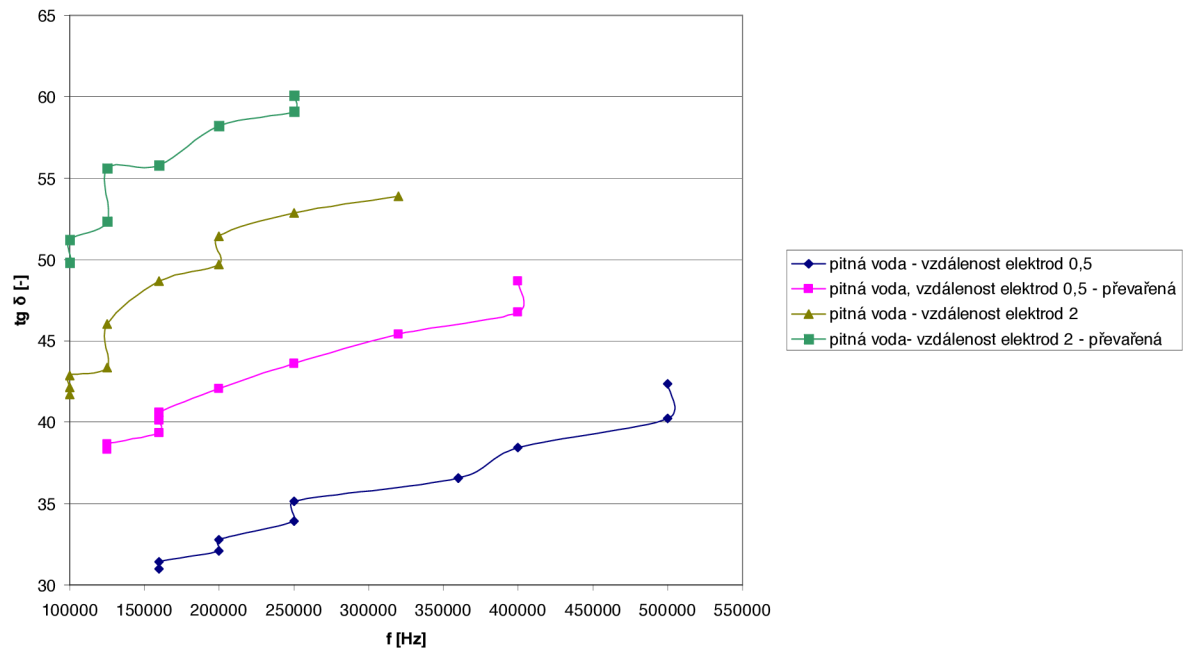
Obrázek 27: molární polarizace pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Jak již bylo řečeno výše, maximální hodnoty ztrátového činitele se oproti deionizované posunuly do oblasti vysokých kmitočtů. V tabulce 15 jsou tyto hodnoty porovnány a průběhy jsou vyobrazeny v grafu na obrázku 28.

Tabulka 15: maximální hodnoty ztrátového činitele, pitná voda

vzdálenost elektrod 0,5						vzdálenost elektrod 2					
pitná voda			pitná voda - převařená			pitná voda			pitná voda - převařená		
t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]	t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]	t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]	t [°C]	tgδ max [-]	f[Hz]
20	31	160000	20	38,33	125000	20	41,7	100000	20	47,52	80000
25	31,42	160000	25	38,65	125000	25	42,14	100000	25	49,26	80000
30	32,08	200000	30	39,34	160000	30	42,88	100000	30	49,8	100000
35	32,77	200000	35	40,11	160000	35	43,37	125000	35	51,2	100000
40	33,91	250000	40	40,59	160000	40	46,02	125000	40	52,34	125000
50	35,138	250000	50	42,07	200000	50	48,67	160000	50	55,61	125000
60	36,58	360000	60	43,61	250000	60	49,69	200000	60	55,78	160000
70	38,45	400000	70	45,4	320000	70	51,41	200000	70	58,21	200000
80	40,24	500000	80	46,77	400000	80	52,84	250000	80	59,09	250000
90	42,38	500000	90	48,67	400000	90	53,88	320000	90	60,1	250000

Závislost maximální hodnoty ztrátového činitele na frekvenci



Obrázek 28: porovnání průběhu změny hodnot $\text{tg } \delta \text{ max.}$ pro vzorky pitné vody

7. Závěr

Diplomová práce navazuje na semestrální projekt 2.

Práce je rozdělena do 6 kapitol. První kapitola popisuje základní rozdělení typů vody, tak jak ji vnímáme denně, v běžném životě. Dělíme ji podle skupenství (led, kapalina, pára), podle tvrdosti (měkká, tvrdá a velmi tvrdá voda), podle slanosti (voda sladká, slaná a brakická) a další. Druhá kapitola popisuje již přímo specifické vlastnosti vody s ohledem na její chemickou strukturu. Je zde popsána molekula vody, jednotlivé vodíkové vazby mezi atomy a typické hodnoty pro pH, vodivosti, povrchového napětí, viskozity a hustoty. Mezi nejdůležitější vlastnosti vody patří relativně vysoký bod varu 100°C. Pro přeměnu vody na páru je potřeba velké množství energie (540cal/g nebo 9720cal/mol). Další důležitou vlastností vody je hustota. Největší hustotu nemá led, ale tekutá voda při 3,95 °C, dalším snižováním teploty se objem jednotkové hmotnosti vody zase zvětšuje.

Kapitola 4 popisují stále více používanou deionizovanou vodu, což je voda zbavená všech nečistot. Samostatná kapitola je pak věnována dielektrikům v elektrickém poli a především pak určování dipólového momentu z Claus-Mossotiho rovnice a měření ztrátového činitele a relativní permitivity.

Praktická část mé práce má 2 části. Nejprve bylo třeba navrhnout vhodný měřicí elektroodový systém. Veškerá výsledná výkresová dokumentace je uvedena v příloze mé práce.

Pro srovnání bylo měření prováděno na vypůjčeném elektroodovém systému s označením Agilent 16542A (viz obr. 8). Výsledky z měření jsou zpracovány v kapitole 6.

Měření jsem prováděla pro dva vzorky vody a to vodu deionizovanou a vodu pitnou. Elektroodový systém umožňuje vložení distančních kroužků (podložek) o různých tloušťkách, čímž vzniká větší prostor mezi elektrodami a tím se zvyšuje i objem měřené kapaliny. Byla použita podložka o šířce 0,5 mm, tedy vzdálenost elektrod (objem vstříknuté kapaliny do systému - 2ml) a podložka 2mm, tedy vzdálenost elektrod (objem kapaliny 4ml). Během měření deionizované vody byl kladen velký důraz na čistotu prostředí a na čistotu pomůcek, které přišly do kontaktu s měřeným vzorkem. Tato voda na sebe okamžitě po napuštění do kádinky začne vázat CO₂ a jiné nečistoty, především prachové částičky. Před každým měření proto byl celý elektroodový systém (včetně podložek) vyčištěn isopropylalkoholem a několikrát propláchnut deionizovanou vodou. Pro vstříkování vzorků do elektroodového systému byla pro každý vzorek použita zvláštní sterilní injekční stříkačka.

Po odměření vzorku deionizované vody pro obě podložky jsem nabrala nové vzorky vody, které jsem po dobu 10 minut převařila. Poté jsem provedla měření na těchto vzorcích. Po odměření všech vzorků deionizované vody jsem celé měření provedla znovu pro vodu pitnou. Tento vzorek vody byl odebrán do zvláštních kádinek z kohoutku přímo v laboratoři. V kapitole 6.4.1 jsou zpracovány naměřené výsledky pro vodu deionizovanou, v kapitole 6.4.2 pak pro vodu pitnou. Z grafů a tabulek jsou jasně patrné rozdíly mezi oběma druhy měřených vod. Hlavní rozdíl mezi pitnou a deionizovanou vodou je v hodnotách relativní permitivity a ztrátového činitele. Relativní permitivita pro pitnou vodu má hodnoty o 3 řády vyšší než tomu je u vody pitné. Rozdíl v hodnotách ztrátového činitele není tak velký, v obou případech se jeho hodnoty pohybují v řádu desítek. Liší se frekvence, při kterých dosahují svým maximálních hodnot. U deionizované vody jsou maxima při nízkých frekvencích a od kmitočtu 10kHz se již téměř nemění. U pitné vody tomu je naopak. Do frekvence 10kHz zůstávají hodnoty téměř stejné a až v oblasti vysokých kmitočtů dosahují svých maxim. Konkrétní hodnoty a grafické závislosti jsou uvedeny v příslušných kapitolách.

8 Seznam zkratek

Veličina	Jednotka	Název/význam
C_p	[F]	kapacita dielektrika
C_0	[F]	kapacita vzduchu
DL		deionizovaná voda
E	[V/m]	intenzita elektrického pole
F	[Hz]	frekvence
F	[N]	síla
H		vodík
HCL		kyselina chlorovodíková
H ₂ O		chemické označení vody
I	[cm]	délka
l	[m]	délka
m	[C*m]	dipólový moment
M	[kg/mol]	molekulová hmotnost vody
N_A		Avogadrova konstanta $6,02214 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
NaOH		anex hydroxin sodný
O		chemické označení kyslíku
pH		hodnota pH
PC		počítač s příslušenstvím
PM	[m ³ *kmol ⁻¹]	molární polarizace
q	[C]	náboj dipólu
R	[Ω]	odpor
RLCG metr		měřicí přístroj Agilent 4284A
R'	[m ³ *kmol ⁻¹]	molární refrakce
S	[cm ²]	průřez
t	[°C]	teplota
tg δ	[-]	ztrátový činitel
UH4		termostat
Δx	[m]	vzdálenost vrstev
Δv	[m/s]	rozdíl rychlostí
ρ	[kg/m ³]	hustota vody
σ	[N/m]	povrchové napětí
η	[Pa*s]	viskozita
ϵ'	[-]	ztrátové číslo
ϵ_0		permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
ϵ_r	[-]	relativní permitivita
ϵ^*		komplexní permitivita
α_e		elektronová polarizovatelnost
α_d		dipólová polarizovatelnost
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlový kmitočet

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: molekula vody – atomární skladba [7]	10 -
Obrázek 2: nerovnováha kladného a záporného pólu – vznik vodíkového můstku [7].....	11 -
Obrázek 3: Závislost viskozity vody na teplotě [2].....	14 -
Obrázek 4: hodnoty odporu a vodivosti pro jednotlivé typy vod [6]	15 -
Obrázek 5: Paralelní a sériové zapojení náhradního zapojení [10]	20 -
Obrázek 6: a) kmitočtová závislost ztrátového činitele.....	20 -
Obrázek 7: schéma uspořádání elektrodového systému [8]	24 -
Obrázek 8: zapojení měřicího pracoviště	25 -
Obrázek 9: nádoba pro vkládání do olejové lázně.....	25 -
Obrázek 10: propojení elektrodového systému s měřícím RLCG metrem [11].....	26 -
Obrázek 11: způsob plnění elektrodového systému kapalinou[11].....	27 -
Obrázek 12: hloubka ponoření elektrodového systému v nádobě.....	28 -
Obrázek 13: nastavení parametrů měření.....	29 -
Obrázek 14: graf závislosti ztrátového činitele a kapacity na frekvenci	31 -
Obrázek 15: graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty, vzdálenost elektrod 2mm.....	34 -
Obrázek 16: graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty, vzdálenost elektrod 2mm.....	35 -
Obrázek 17: graf závislosti poměrové polarizace na frekvenci pro různé teploty, podložka 2mm...-	36 -
Obrázek 18: graf závislost polarizovatelnosti na frekvenci pro různé teploty, vzdálenost elektrod 2mm-37 -	
Obrázek 19: graf závislosti změny molární polarizace na frekvenci.....	38 -
Obrázek 20: porovnání průběhu změny hodnot $\text{tg } \delta \text{ max.}$ pro 2 vzorky deionizované vody, vzdálenost elektrod 2mm.....	39 -
Obrázek 21: porovnání průběhu změny hodnot $\text{tg } \delta \text{ max.}$ pro 2 vzorky deionizované vody, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	40 -
Obrázek 22: porovnání maximálních hodnot $\text{tg } \delta$ pro všechny vzorky deionizované vody.....	41 -
Obrázek 23: graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	43 -
Obrázek 24: graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	44 -
Obrázek 25: změna polarizovatelnosti pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm...-	45 -
Obrázek 26: poměrová polarizace pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	45 -
Obrázek 27: molární polarizace pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm	46 -
Obrázek 28: porovnání průběhu změny hodnot $\text{tg } \delta \text{ max.}$ pro vzorky pitné vody	47 -
Obrázek 29: graf závislosti relativní permitivity pro různé teploty, deionizovaná voda, podložka 0,5mm.....	54 -
Obrázek 30: graf závislosti ztrátového činitele pro různé teploty, deionizovaná voda, podložka 0,5mm -	54 -
Obrázek 31: graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, podložka 2mm.....	55 -
Obrázek 32: závislost ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, podložka 2mm ...-	55 -

10. Seznam tabulek

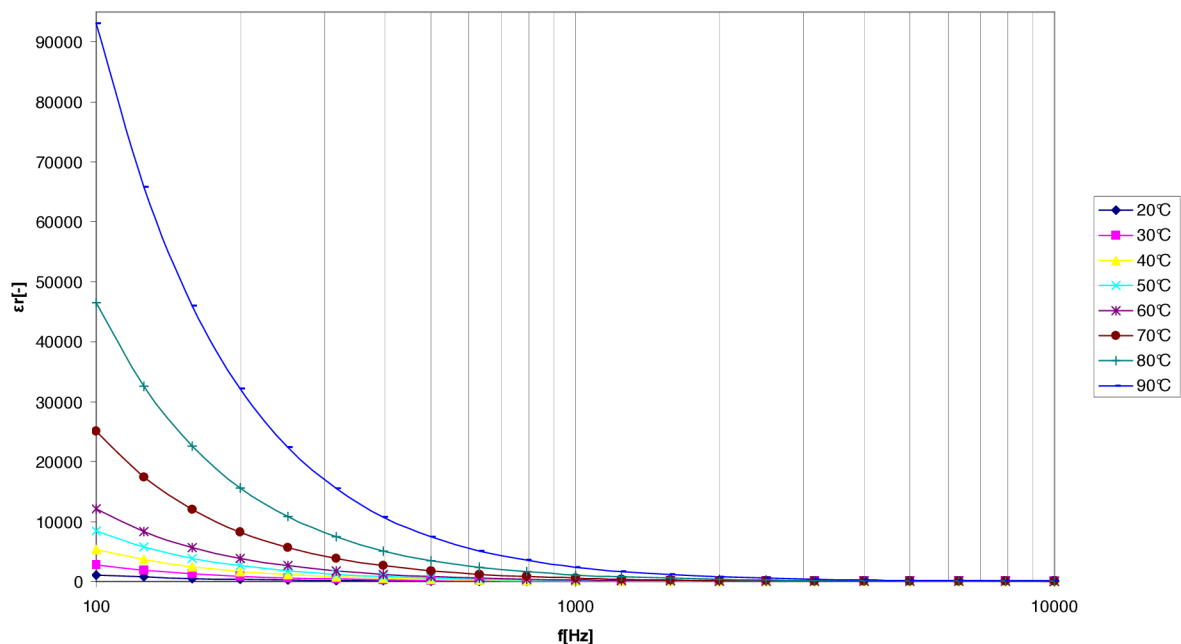
Tabulka 1: naměřené hodnoty pro deionizovanou vodu převařenou, podložka 2mm.....	- 30 -
Tabulka 2: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 32 -
Tabulka 3: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	- 33 -
Tabulka 4: ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 34 -
Tabulka 5: : ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	- 34 -
Tabulka 6: změna poměrové polarizace pro vzrůstající teploty a frekvence, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 36 -
Tabulka 7: Polarizovatelnost při vzrůstající teplotě a frekvenci, deionizovaná voda, podložka 2mm-	37
-	
Tabulka 8: Molární polarizace pro vzrůstající teploty a frekvence, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 38 -
Tabulka 9: max. hodnoty ztrátového činitele,deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 39 -
Tabulka 10: maximální hodnoty ztrátového činitele, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm..	- 40 -
-	
Tabulka 11: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	- 42 -
Tabulka 12: relativní permitivita pro vzrůstající teplotu a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 42 -
Tabulka 13: ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 2mm.....	- 43 -
Tabulka 14: ztrátový činitel v závislosti na vzrůstající teplotě a frekvenci, pitná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm.....	- 44 -
Tabulka 15: maximální hodnoty ztrátového činitele, pitná voda	- 46 -

11. Použitá literatura

- [1] <http://www.fpv.umb.sk/~vzdchem/KEGA/TUR/VODA/VlastnostiVody.htm>, Chemie vody online
- [2] <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>, online
- [3] HANSMAN, J., ŤERT, V.: *Přívoda a jiné léčivé vody*. FONTÁNA, 2004, 226 stran. ISBN 80-7336-177-9.
- [4] BUŇATA, T.: *Vlastnosti vody*. Praha: ČZU, 2004. [Citace: 5. prosinec 2009].
Dostupné na WWW:
<http://tnet.bunata.cz/czu/Cistirny%20odpadnich%20vod/Chemicke%20a%20fyzikalni%20vlastnosti%20vody2.pdf>
- [5] TRUMAN, S., STUART, L. : *The fundamental conductivity and resistivity of water*. The electrochemical society, 2004
- [6] Deionized water, application bulletin. Dostupné na www.myronl.com
- [7] Fyzikální vysvětlení pi-vody, dostupné online na [www](http://www.medunka.wz.cz/2010/10/Fyzikalni-vysvetleni-pi-vody.html):
<http://medunka.wz.cz/2010/10/Fyzikalni-vysvetleni-pi-vody.html>
- [8] Operation and service manual - Agilent 16452A Liquid Test Fixture; Agilent Part No. 16452-90000, Printed in JAPAN January 2000, Third Edition
- [9] LIEDERMANN, K., HOLCMAN, V. : Dielektrická relaxační spektroskopie – OPVK 2.3, VUT v Brně 2010
- [10] JIRÁK, J a kol.: *Materiály a technická dokumentace – část: Materiály v elektrotechnie*. Brno: Vysoké učení technické, 2003
- [11] Dostupné na WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/16452-90000.pdf>>.

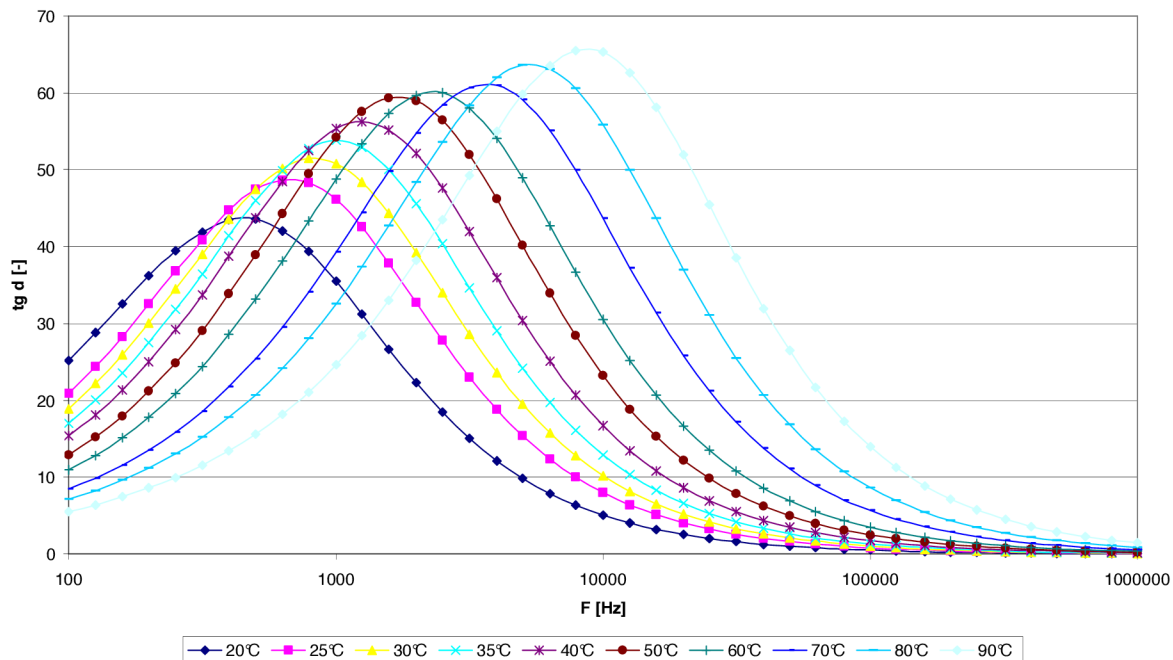
12. Přílohy

Závislost relativní permittivity na frekvenci



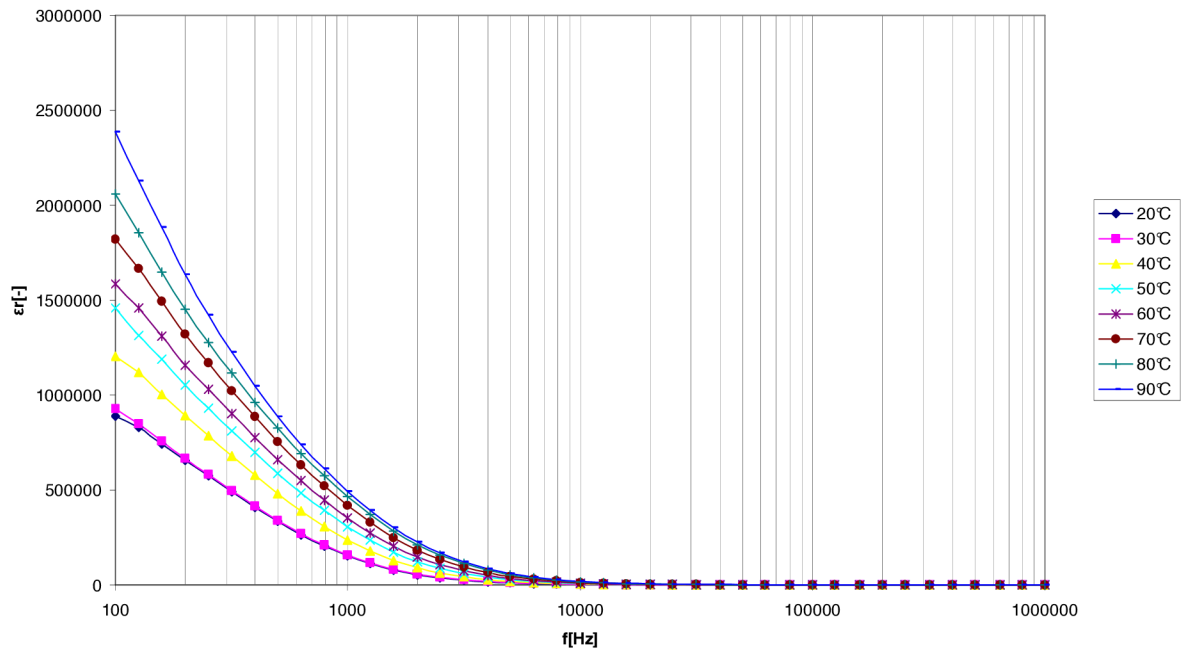
Obrázek 29: graf závislosti relativní permittivity pro různé teploty, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Změna ztrátového činitele s teplotou - deionizovaná voda, podložka 0,5mm



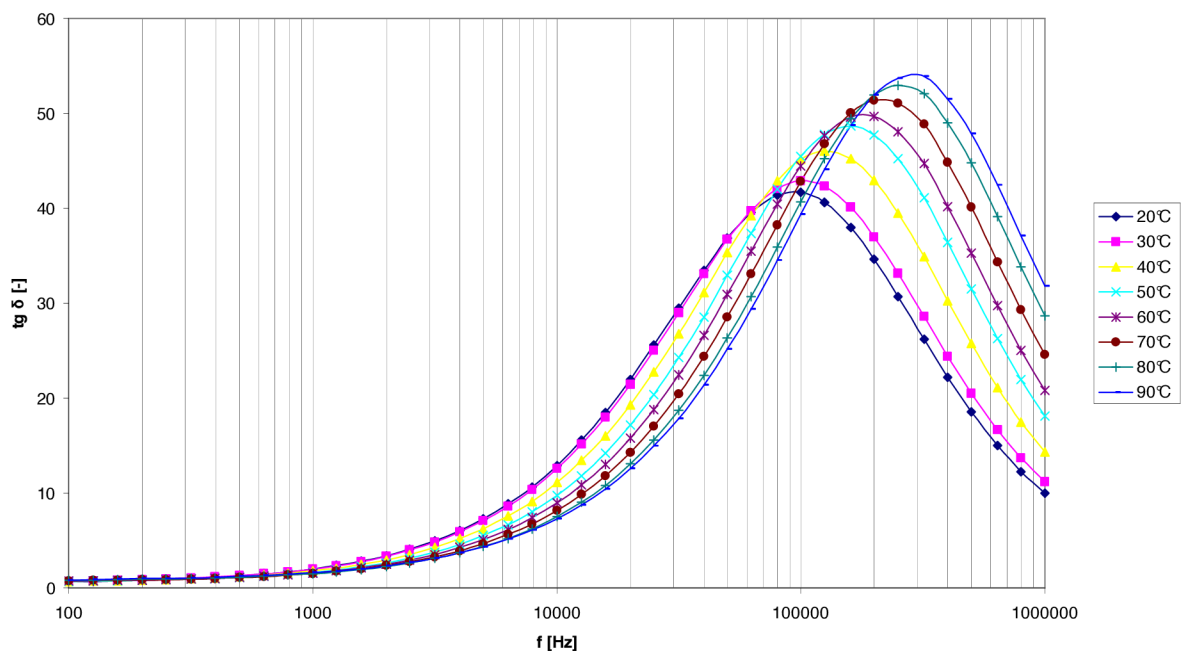
Obrázek 30: graf závislosti ztrátového činitele pro různé teploty, deionizovaná voda, vzdálenost elektrod 0,5mm

Závislost relativní permitivity na frekvenci

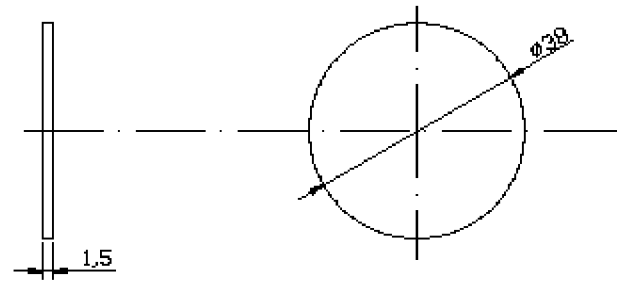


Obrázek 31: graf závislosti relativní permitivity na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 2mm

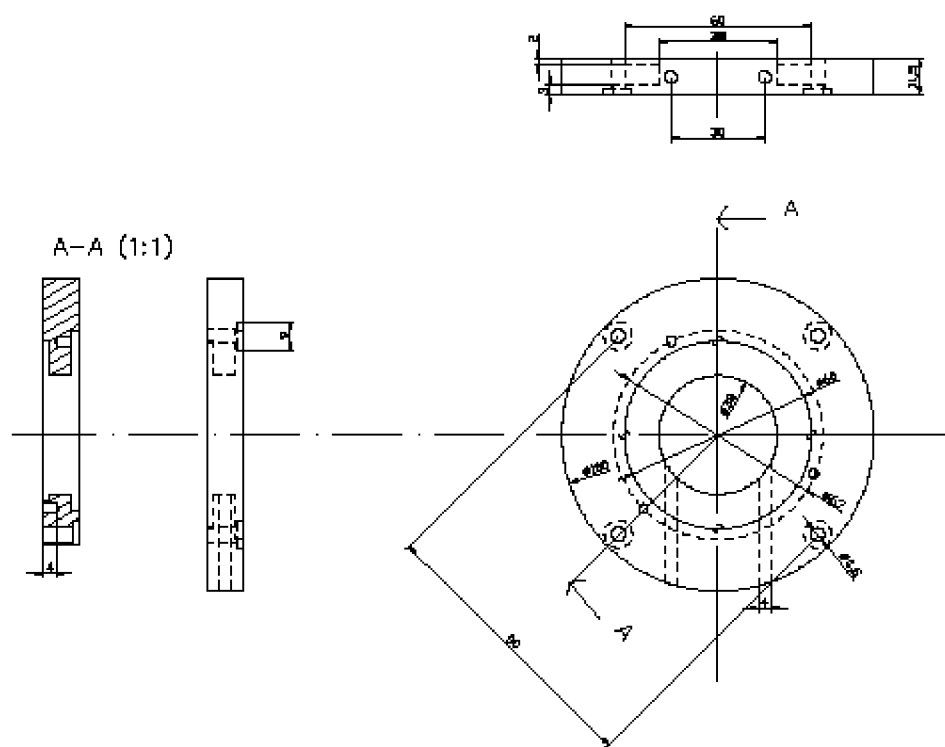
Závislost ztrátového činitele na frekvenci



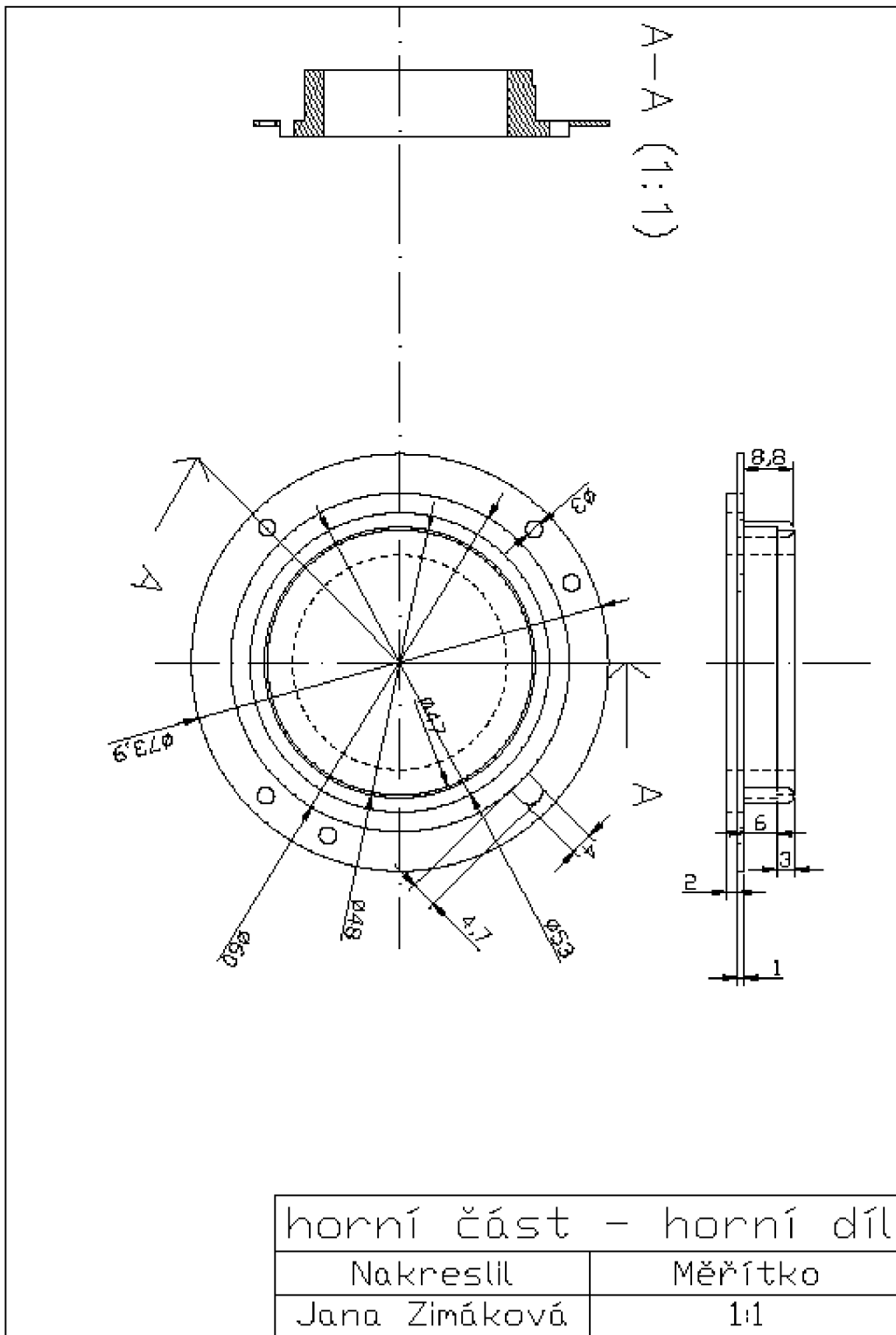
Obrázek 32: závislost ztrátového činitele na frekvenci pro různé teploty, pitná voda, vzdálenost elektrod 2mm

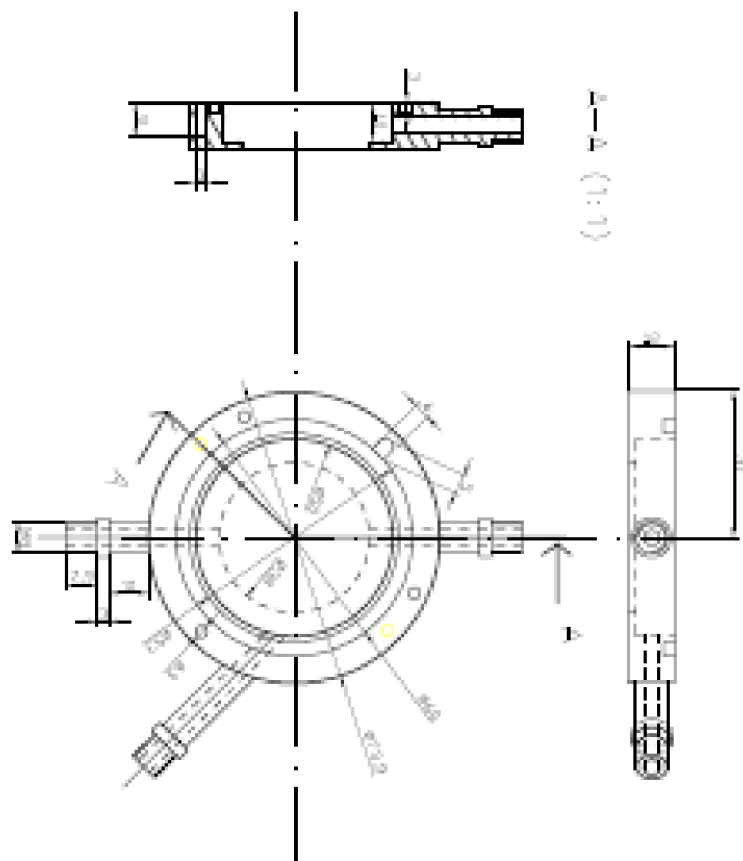


Elektroda	
Nakreslil	Měřítko
Jana Zimáková	1:1



horní část - spodní díl	
Nakreslil	Měřítko
Jana Zimáková	1:1

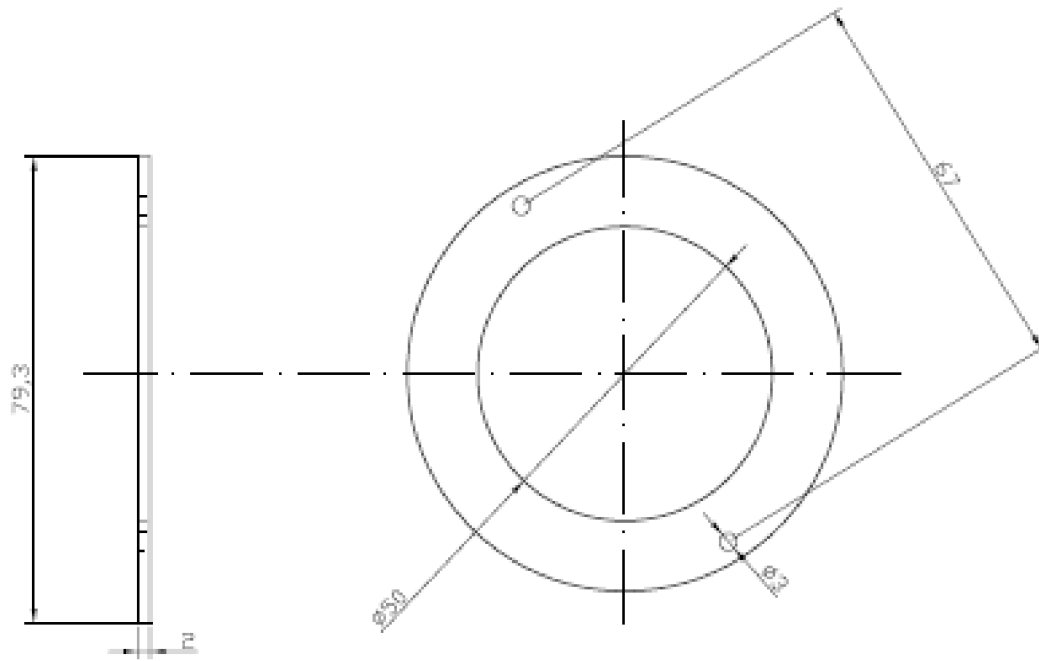




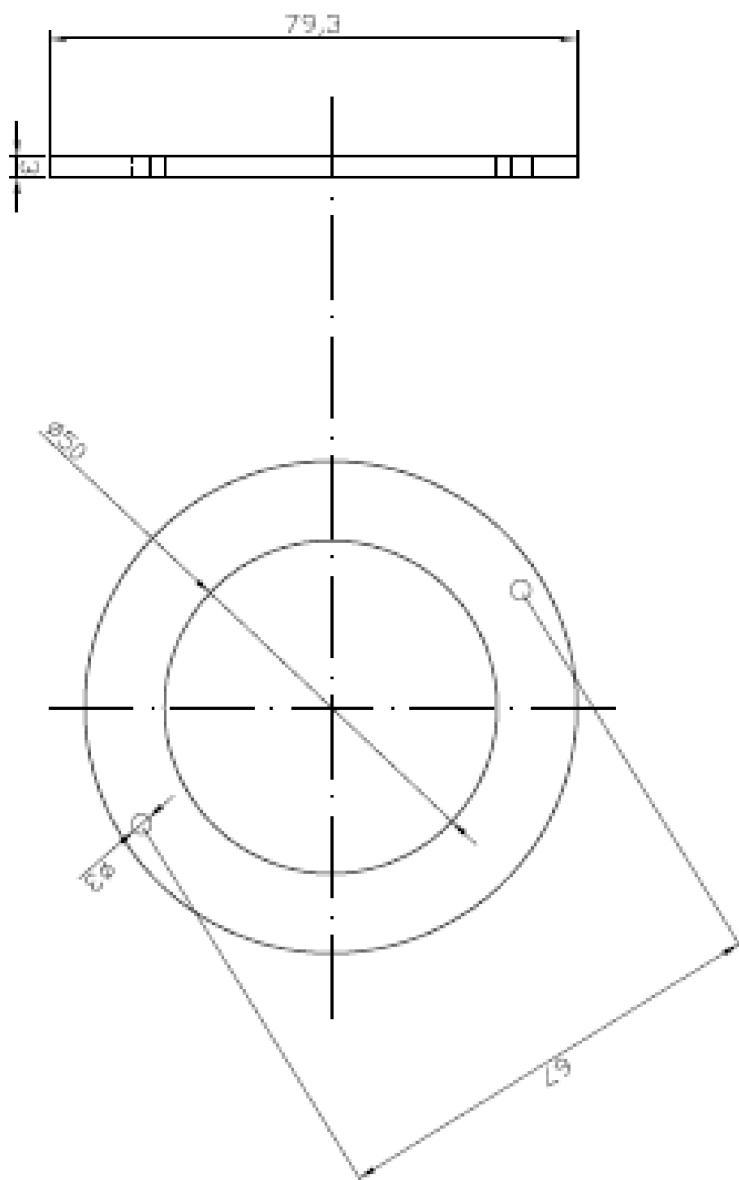
spodní část - horní díl

Jana Zimáková

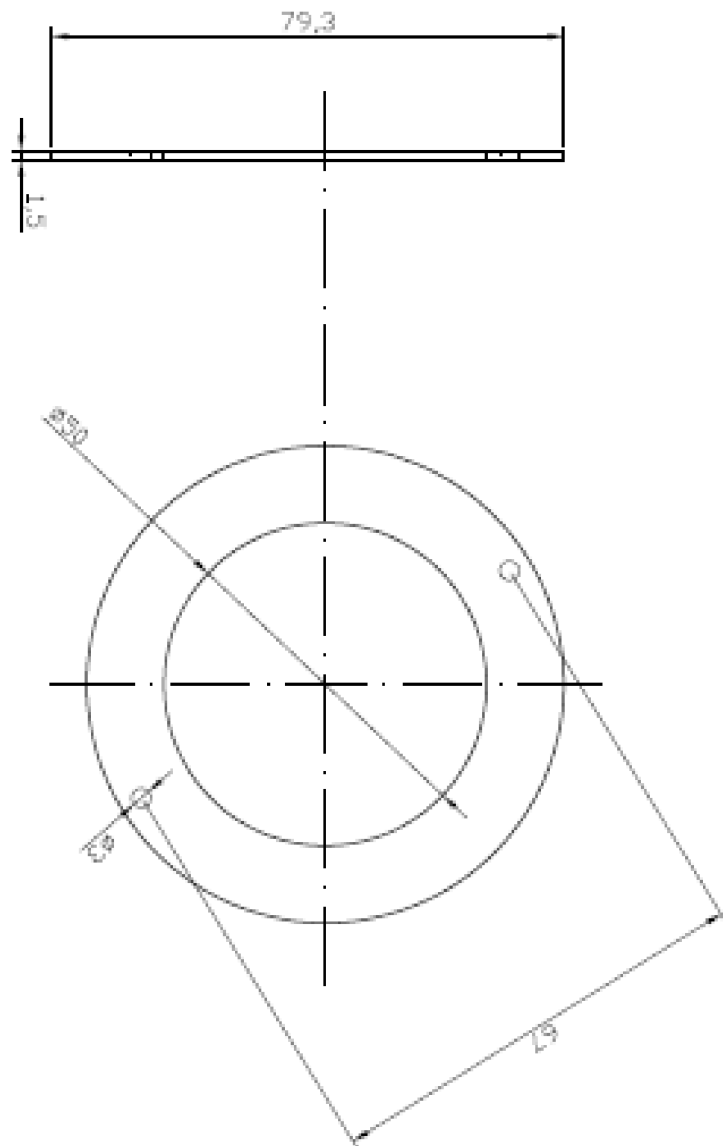
1:1



Podložka 2	
Nakreslil	Měřítko
Jana Zimáková	1:1



Podložka 3	
Nakreslil	Měřičtko
Jana Zimáková	111



Podložka 1,5	
Nakreslil	Měřičko
Jana Zimáková	111