

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra technologií a měření**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické  
diagnostice**

Plzeň 2012

Jiří Ulrych

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

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

Jméno a příjmení: **Jiří ULRYCH**  
Osobní číslo: **E10N0223P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice**  
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. Proveďte teoretický rozbor polarizačních mechanismů dielektrika
2. Popište metodu dielektrické spektroskopie
3. Definujte konkrétní možnosti aplikace dielektrické spektroskopie

Rozsah grafických prací: dle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

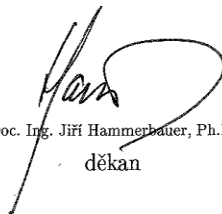
Seznam odborné literatury:

1. Bouda, V.: Materiály pro elektrotechniku, ČVUT 2000
2. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006
3. Elektronické informační zdroje, Databáze Sciecedirect, Wiley Interscience

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

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

Termín odevzdání diplomové práce: **3. června 2012**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena především na využití dielektrické spektroskopie. Jedná se o velmi důležité téma, protože dielektrický podsystem elektrického zařízení je ze všech jeho dílčích podsystemů nejvíce poruchový. Výzkum a vývoj dielektrických materiálů musí proto neustále pokračovat. Cílem práce je vysvětlit polarizační mechanismy a na základě teoretických předpokladů a naměřených dat provést diagnostiku vzorků, které byly vystaveny procesu zrychleného tepelného stárnutí při různých teplotách a časech expozice.

### **Klíčová slova:**

Dielektrikum, polarizační procesy, diagnostika, dielektrická spektroskopie, relativní permitivita

191 stran

35 obrázků

8 tabulek

31 příloh

ZČU, FEL, Plzeň 30. dubna 2012

## **Summary**

This thesis is focused especially on the utilization of dielectric spectroscopy. The theme concerned is very important, as the dielectric subsystem of electrical devices is the most defective one of all their part systems. The research and development of dielectric materials must therefore be continued permanently. The aim of this work is to explain polarization mechanisms and to carry out the diagnostic of samples, which were processed by accelerated ageing at different temperatures and exposition times, based on the theoretic assumptions and measured data.

### **Key words:**

Dielectric, polarization mechanisms, diagnostic, dielectric spectroscopy, relative permittivity

191 pages

35 figures

8 tables

31 annexes

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne ..... podpis .....

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Teoretický rozbor polarizačních mechanismů dielektrika</b>	<b>9</b>
1.1 Základní složení látek	9
1.1.1 Elektrotechnická látka a materiál	9
1.1.2 Obecné rozdělení materiálů pro elektrotechnické aplikace	9
1.1.3 Vlastnosti nosičů elektrických nábojů	9
1.1.3.1 Volné nosiče	9
1.1.3.2 Vázané nosiče	10
1.1.4 Systém elektrického zařízení	10
<b>1.2 Dielektrický podsystém elektrických zařízení</b>	<b>10</b>
1.2.1 Rozdělení dielektrik podle skupenství	11
1.2.2 Rozdělení dielektrik podle polárnosti	11
1.2.3 Rozdělení pevných dielektrik podle struktury	19
<b>1.3 Polarizace dielektrika</b>	<b>21</b>
1.3.1 Polarizace dielektrika s působením vnějšího elektrického pole	21
1.3.1.1 Makroskopický přístup	22
1.3.1.2 Mikroskopický přístup	24
1.3.1.3 Mechanismy polarizací a jejich druhy	26
1.3.1.4 Dielektrikum v elektrostatickém poli	36
1.3.1.5 Dielektrikum ve střídavém (nestacionárním) elektrickém poli	36
1.3.2 Polarizace bez působení vnějšího elektrického pole	42
1.3.2.1 Piezoelektrická polarizace	42
1.3.2.2 Spontánní polarizace	42
<b>1.4 Elektrická vodivost dielektrik</b>	<b>43</b>
1.4.1 Hodnocení dielektrik	43
1.4.1.1 Hodnocení z hlediska měrného elektrického odporu	43
1.4.1.2 Hodnocení z hlediska typů volných nosičů elektrického náboje	44
1.4.2 Elektrická vodivost plyných dielektrik	45
1.4.3 Elektrická vodivost kapalných dielektrik	45
1.4.4 Elektrická vodivost pevných dielektrik	46
1.4.4.1 Povrchová vodivost pevných dielektrik	47
<b>1.5 Dielektrické ztráty</b>	<b>49</b>
1.5.1 Druhy dielektrických ztrát	49
1.5.1.1 Polarizační ztráty	49
1.5.1.2 Vodivostní ztráty	50
1.5.1.3 Ionizační ztráty	50
1.5.2 Dielektrické ztráty podle druhu působícího elektrického pole	51
1.5.2.1 Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli	51
1.5.2.2 Dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli	51
1.5.3 Dielektrické ztráty podle skupenství	55
1.5.3.1 Dielektrické ztráty plyných dielektrik	55
1.5.3.2 Dielektrické ztráty kapalných dielektrik	56
1.5.3.3 Dielektrické ztráty pevných dielektrik	56
<b>2 Dielektrická spektroskopie</b>	<b>59</b>
<b>2.1 Maxwellovy rovnice</b>	<b>59</b>
<b>2.2 Elektrotechnologická diagnostika dielektrických materiálů</b>	<b>61</b>
<b>2.3 Metoda dielektrické spektroskopie</b>	<b>62</b>
<b>2.4 Využití dielektrických vlastností</b>	<b>62</b>

<b>3</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>63</b>
<b>3.1</b>	<b>Popis měření</b>	<b>63</b>
<b>3.2</b>	<b>Postup měření</b>	<b>65</b>
3.2.1	Popis měřených dielektrických materiálů	65
3.2.2	Vztahy pro výpočet vlastností měřených dielektrických materiálů	66
<b>3.3</b>	<b>Použité měřicí přístroje a příslušenství</b>	<b>67</b>
3.3.1	Zařízení Agilent E4980A	67
3.3.2	Elektroodový systém 16451B	68
3.3.2.1	Metoda paralelního elektroodového systému	68
3.3.2.2	Kontaktní elektroodová metoda	69
3.3.2.3	Základní specifikace 16451B	70
<b>3.4</b>	<b>Vyhodnocení výsledků měření</b>	<b>74</b>
3.4.1	Teoretické předpoklady	74
3.4.2	První typ vyhodnocovaných grafů	75
3.4.2.1	Vyhodnocení relativní permitivity	75
3.4.2.2	Vyhodnocení ztrátového čísla	79
3.4.2.3	Vyhodnocení ztrátového činitele	81
3.4.2.4	Vyhodnocení paralelní kapacity	84
3.4.2.5	Vyhodnocení paralelního odporu	88
3.4.2.6	Vyhodnocení komplexní impedance	91
3.4.2.7	Vyhodnocení dielektrických materiálů v dodaném stavu	95
3.4.3	Druhý typ vyhodnocovaných grafů	102
3.4.3.1	Sledování celkových trendů dielektrických vlastností v závislosti na čase	102
3.4.3.2	Sledování lokálních trendů dielektrických vlastností v závislosti na čase	115
<b>3.5</b>	<b>Využití vyhodnocených výsledků měření</b>	<b>115</b>
	<b>Závěr</b>	<b>117</b>
	<b>Literatura</b>	<b>118</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>121</b>



# Úvod

Jestliže má elektrické zařízení splňovat požadavky na vysokou spolehlivost a životnost, je potřeba, aby bylo při výrobě opatřeno co nejvhodnějšími dielektrickými materiály s ohledem na konkrétní využití daného zařízení. Systém elektrického zařízení má čtyři základní podsystémy. Jedná se o podsystém konstrukční, magnetický, elektrický a dielektrický. Všechny čtyři podsystémy jsou nezbytné pro správnou funkci elektrického zařízení. Tyto podsystémy jsou v podstatě čtyři sériové prvky a při poruše kteréhokoliv z nich, elektrické zařízení vykonává svojí funkci špatně nebo vůbec. Nejslabším článkem sériového řetězce je dielektrický podsystém, proto je třeba vyvíjet diagnostické metody pro sledování stavu dielektrických materiálů.

Práce je rozdělena na tři části. První část se zabývá teoretickým rozbohem polarizačních mechanismů dielektrika. Je zde vymezen makroskopický a mikroskopický přístup, dále jsou zde vysvětleny mechanismy polarizací a jejich druhy, popis chování dielektrika hlavně ve střídavém poli, vodivost dielektrika a dielektrické ztráty. Pomocí teoretické části se určily teoretické předpoklady k vyhodnocení grafů v experimentální části.

Druhá část se zabývá popisem dielektrické spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice. Nejprve je zde vymezen pojem elektrotechnologická diagnostika a s návazností na ni je zde vysvětlen princip dielektrické spektroskopie. Na konci této části je uvedeno možné využití dielektrických vlastností mimo oblast elektrotechniky.

Třetí část se zabývá praktickým měřením dielektrických materiálů a jejich vyhodnocením. V práci je nazvána jako experimentální část. Je zde popsán postup měření, popis měřících přístrojů a příslušenství, popis měřících metod a nakonec je zde uveden rozbor grafů z naměřených hodnot a jejich vyhodnocení.

# 1 Teoretický rozbor polarizačních mechanismů dielektrika

## 1.1 Základní složení látek

Každá látka je systém, který se skládá z molekul. Systém je obecně dán množinou systémových prvků a vazbami mezi těmito prvky. Molekuly se skládají obecně z atomů a atomy se skládají z atomového jádra a atomového obalu. Atomové jádro se skládá z protonů a neutronů. Tyto částice se dohromady nazývají nukleony. Atomový obal se skládá z elektronů. Neutrální atom má stejný počet protonů a elektronů. [3]

### 1.1.1 Elektrotechnická látka a materiál

Je zapotřebí rozdělovat látku a materiál. Látka je systém atomů, který existuje ve formě čistých prvků nebo sloučenin. Materiál je látka, která je však vyráběna za konkrétním účelem. Materiál má tedy určité požadované vlastnosti a používá se v technické praxi. Konkrétně elektrotechnický materiál má určitý vztah k elektrickému i magnetickému poli a je základním prvkem pro každé elektrotechnické zařízení. [3]

### 1.1.2 Obecné rozdělení materiálů pro elektrotechnické aplikace

Rozdělení materiálů pro elektrotechnické aplikace je možné udělat třemi způsoby. První způsob je rozdělení podle struktury, druhý způsob je rozdělení podle skupenství a třetí způsob je rozdělení podle vlastností nosičů elektrických nábojů. Skupenství udává, jestli se jedná o látku pevnou, kapalnou nebo plynnou. Struktura podává informace o vnitřních vazbách v látce. Vlastnosti nosičů elektrických nábojů pak určují rozdíly mezi volnými a vázanými nosiči elektrického náboje. [1, 2, 3]

### 1.1.3 Vlastnosti nosičů elektrických nábojů

Nosiče elektrického náboje jsou částice, které nesou elementární náboj  $q$  [C]. Nosiče elektrického náboje se tedy dělí na volné a vázané. [2]

#### 1.1.3.1 Volné nosiče

Volné nosiče elektrického náboje se mohou volně pohybovat materiálem. Materiály s vysokou koncentrací těchto nosičů se vyznačují i vysokou elektrickou vodivostí a nazývají se vodiče. Materiály s malou koncentrací volných nosičů se nazývají dielektrika. Tato práce

se zabývá dielektriky. Volné nosiče jsou obecně volné ionty nebo volné elektrony a pohybují-li se působením vnějšího elektrického pole v určitém směru, vzniká elektrický proud. Volné ionty vznikají disociací (rozkladem) molekul nečistot v materiálu nebo i disociací vlastních molekul materiálu a mohou se volně pohybovat. Na vzniku elektrického proudu se mohou podílet kladné i záporné ionty. Volné elektrony vznikají tak, že se u některých látek uvolní nejbližší elektrony a ty se pak mohou pohybovat v meziatomovém prostoru nepravidelným pohybem. Působí-li na tyto volné elektrony vnější elektrické pole, vznikne tok těchto volných elektronů ve směru působícího pole, který se nazývá elektrický proud. Nejvíce volných elektronů mají kovy. [1, 2]

### **1.1.3.2 Vázané nosiče**

Vázané nosiče mají, na rozdíl od volných nosičů, ve struktuře látky svoje pevné místo. Jedná se o molekuly, které jsou tvořeny obecně atomy, jejichž vazby určí, jak se molekula bude v elektrickém poli chovat. Vázané nosiče se dělí na silně vázané a slabě vázané. Při působení vnějšího elektrického pole dochází u slabě vázaných nosičů k jejich pootočení do směru pole a toto pootočení je poměrně veliké. U silně vázaných nosičů dochází pouze k malému pootočení do směru pole. [2]

### **1.1.4 Systém elektrického zařízení**

Systém elektrického zařízení má čtyři základní podsystémy. Jedná se o podsystém konstrukční, magnetický, elektrický a dielektrický. Všechny čtyři podsystémy jsou nezbytné pro správnou funkci elektrického zařízení. Tyto podsystémy jsou v podstatě čtyři sériové prvky a při poruše kteréhokoliv z nich, elektrické zařízení vykonává svojí funkci špatně nebo vůbec. Nejvíce poruchový z těchto podsystémů je právě dielektrický podsystém. Proto je třeba tento podsystém neustále zdokonalovat. [2, 3]

## **1.2 Dielektrický podsystém elektrických zařízení**

Nejprve je třeba rozlišit rozdíl mezi dielektrikem a izolantem. Izolant je materiál, který brání průchodu proudu mezi místy s vyšším a nižším elektrickým potenciálem. Izolant je tedy pasivní prvek. Dobrý izolant musí mít potřebné vlastnosti elektrické, mechanické, tepelné a fyzikálně-chemické. Elektrické vlastnosti izolantu jsou vysoká elektrická pevnost, vysoký izolační odpor, malá relativní permitivita a co nejnižší ztrátový činitel. Hlavním parametrem izolantů je jejich izolační odpor. Tyto vyjmenované elektrické vlastnosti jsou závislé na

provozních podmínkách (tlak, teplota, frekvence, napětí). Izolant v ideálním případě neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje (ideálně tedy obsahuje pouze silně vázané nosiče elektrického náboje) a izolační odpor ideálního izolantu je nekonečně veliký. Reálný izolant však kromě vázaných nosičů elektrického náboje obsahuje také i určité množství volných nosičů elektrického náboje. Tyto volné nosiče elektrického náboje přispívají k dielektrickým ztrátám v časově neproměnných i proměnných polích. Přítomnost těchto nosičů v izolantu má za následek jeho částečnou vodivost a podílí se na určitých jevech, které mohou vést až k průrazu izolantu. [2, 3, 17]

Dielektrikum je látka schopná si vytvořit v elektrickém poli vlastní vnitřní elektrické pole. Dielektrikum se v tomto přiloženém vnějším poli polarizuje. Jedná se o aktivní prvek, který má svoje specifika a lze jej využít k hromadění elektrické energie v kondenzátorech. Hlavním parametrem dielektrik je relativní permitivita. [2, 3, 17]

Dielektrikum a izolant spolu úzce souvisí, protože izolanty jsou podmnožina dielektrik. Každý izolant je dielektrikum, ale každé dielektrikum není izolantem. Dielektrika se dělí podle skupenství, uspořádání (polární nebo nepolární) a struktury. Nejdůležitější rozdělení dielektrik je podle skupenství. [2, 3]

### **1.2.1 Rozdělení dielektrik podle skupenství**

Skupenství je důležité z hlediska určení elektrických a fyzikálních vlastností dielektrika a také z hlediska proveditelnosti a náročnosti matematického popisu vlastností a chování dielektrika. Skupenství dielektrika může být plynné, kapalné nebo pevné. Tato práce se zabývá především pevnými dielektriky. Plynná, kapalná a pevná dielektrika se rozdělují podle existence takzvaného elementárního dipólu (bez působení pole) na nepolární a polární. Pouze pevná dielektrika se ještě dále rozdělují podle struktury na amorfnní (nekystalická) a krystalická. Krystalická dielektrika mají střed souměrnosti a amorfnní dielektrika střed souměrnosti nemají. Krystalická dielektrika se ještě dělí na polykrystalická dielektrika a monokrystalická. [2]

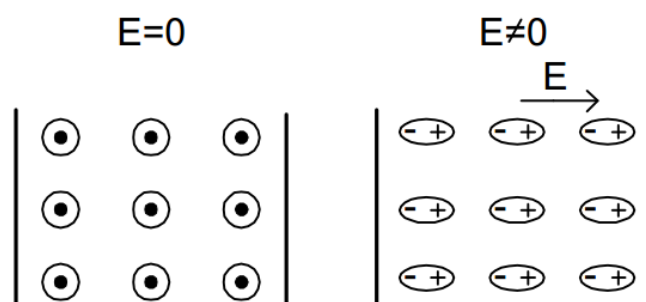
### **1.2.2 Rozdělení dielektrik podle polárnosti**

Toto rozdělení dielektrik je účelné a používané. Rozdělení je učiněno podle toho, zda v dielektriku existují elementární dipóly (molekuly různě směřované) i bez připojení vnějšího elektrického pole (polární dielektrikum) nebo neexistují (nepolární dielektrikum). Nepolární

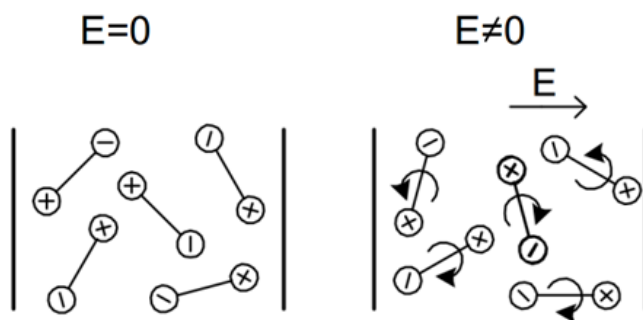
dielektrikum je zobrazeno na *obr. 1.2.1* a polární dielektrikum na *obr. 1.2.2*. Navzájem se liší stavbou hmoty a tudíž i chováním v elektrickém poli. Molekulu tvoří obecně atomy a typ vazeb mezi jednotlivými atomy určí, zda se jedná o molekulu polární nebo nepolární. [2, 15]

U nepolárního dielektrika se proces polarizace odehrává uvnitř atomu. Bez působení elektrického pole mají jádro i elektronový obal shodné těžiště ve středu jádra. V případě přiložení elektrického pole dojde k nepatrnému posunu jádra a elektronového obalu ve směru přiloženého pole. Dojde ke vzniku indukovaného elementárního dipólu. Nepolární dielektrikum může být složené například z nepolárních atomů xenonu ( $Xe$ ) nebo argonu ( $Ar$ ). Nepolární dielektrikum může být rovněž složené z nepolárních molekul například vodíku ( $H_2$ ), kyslíku ( $O_2$ ), chloru ( $Cl_2$ ), metanu ( $CH_4$ ), dusíku ( $N_2$ ), chloridu uhličitého ( $CCl_4$ ) nebo benzenu ( $C_6H_6$ ). [2, 15, 33]

Polární dielektrikum obsahuje ve svém objemu permanentní elementární dipóly. Existence těchto permanentních elementárních dipólů je dána vnitřní strukturou. Dipóly polárních dielektrik jsou molekuly, které jsou náhodně orientované do různých směrů. V případě přiložení elektrického pole začne na tyto dipóly působit točivý moment a dipóly se otočí o určitý úhel do směru tohoto pole. Tato polarizace proběhne za určitou dobu a u různých typů dielektrik je tato doba velice rozdílná. Vzniklá orientace dipólů vytvoří na povrchu dielektrika polarizační náboj, který je třeba kompenzovat dalším nábojem ze zdroje. Polární dielektrikum může být například složené z polárních molekul vody ( $H_2O$ ) nebo amoniaku ( $NH_3$ ). [2, 15, 33]



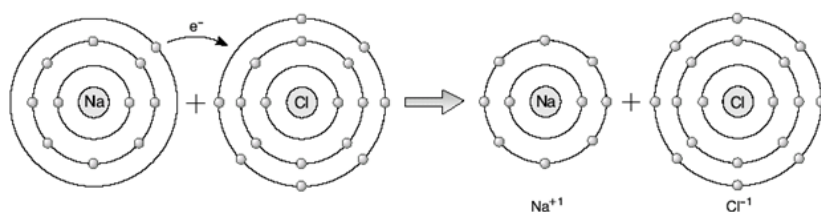
*Obr. 1.2.1* Nepolární dielektrikum [15]



Obr. 1.2.2 Polární dielektrikum [15]

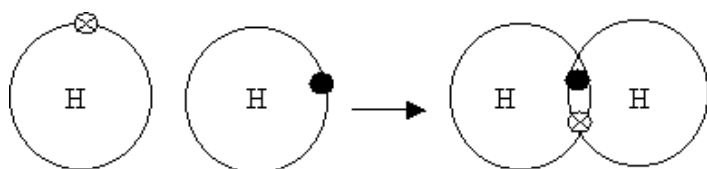
Každá látka a tedy i dielektrikum se skládá z molekul. Molekula je systém, který se obecně skládá ze dvou i více atomů. Existují dva druhy molekul a to molekula prvku a molekula sloučeniny. Molekula prvku se skládá z atomů jednoho druhu a molekula sloučeniny se skládá z různých druhů atomů. Atomy se snaží být co nejstabilnější, a proto vznik molekuly vede vždy k zvýšení stability daného systému. Rozhodující pro vznik vazby mezi atomy je hlavně počet valenčních elektronů. Obecně pro všechny atomy platí, že se navzájem slučují tak, aby získaly elektronovou strukturu inertního plynu (argon, krypton). Tyto inertní plyny mají ve valenční vrstvě osm elektronů. Platí tedy, že atomy jsou nejstabilnější právě tehdy, když mají ve valenční vrstvě osm elektronů. Vazby rozdělujeme na primární a sekundární. Primární vazby jsou iontová, kovalentní. Tyto vazby působí mezi atomy. Mezi primární vazby se řadí ještě vazba kovová. Sekundární vazby jsou vodíková a Van der Waalsova, které působí především mezi molekulami. [3]

Iontová vazba obecně vzniká tak, že reagující atom odevzdá svůj valenční elektron jinému atomu. Tímto způsobem se atomy změň na ionty. Molekulu pak tvoří tyto dva ionty opačných znamének, protože se navzájem přitahují. Jedná se tedy o spojení kationtu s aniontem. Silové působení mezi ionty má elektrostatický charakter. Nejsilnější vazba iontového charakteru vznikne při reakci atomů, které mají maximálně rozdílnou elektronegativitu. Typickým příkladem iontové vazby je kuchyňská sůl ( $\epsilon_r = 5,9$ ). Vznik této iontové vazby je zachycen na obr. 1.2.3. Na kladné ionty se měň atomy, které mají menší elektronegativitu např. sodík ( $Na$ ) a elektrony odevzdávají více elektronegativnímu atomu např. chloru ( $Cl$ ), který se posléze měň na záporný iont. Látky s iontovou vazbou se vyznačují vysokou teplotou tání a varu. [2, 3]



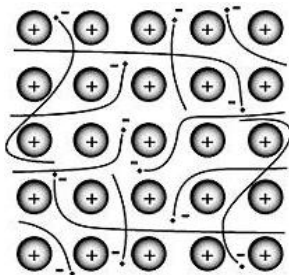
Obr. 1.2.3 Vznik iontové vazby [6]

Při kovalentní vazbě si reagující atomy vzájemně doplňují svoje elektronové obaly a to tak, že reagující atomy se snaží získat podobu inertního plynu. Silové působení kovalentní vazby má elektrostatický charakter. Vazba tohoto typu vzniká mezi atomy, které mají vysokou hodnotu elektronegativity. Tato elektronegativita musí být u těchto reagujících atomů stejná nebo jen málo rozdílná. Kovalentní vazbu mohou tvořit jen nespárované valenční elektrony a tyto elektrony musí mít opačné spiny. Při této vazbě se orbity valenčních elektronů navzájem překrývají. Kovalentní vazba je o to silnější, čím je překrytí valenčních elektronů větší a je obvyklá pro organické molekuly (molekuly, které obsahují uhlík). Příkladem jednoduché kovalentní vazby je molekula vodíku ( $\epsilon_r \cong 1$ ), jejíž vznik je znázorněn na obr. 1.2.4. Látky s kovalentní vazbou se vyznačují vysokou pevností, tvrdostí a také vysokou teplotou tání. [2, 3]



Obr. 1.2.4 Vznik kovalentní vazby [7]

Další primární vazba je vazba kovová. Tato vazba se podstatně liší od kovalentní nebo iontové vazby a vyskytuje se v kovech. Kovová vazba je tvořená volnými elektrony a kladnými ionty. Tyto elektrony se pohybují v látce a nepatří k žádnému iontu. Elektrony tvoří takzvaný elektronový plyn. Kovy tedy mají vysokou tepelnou a elektrickou vodivost. Silové působení v těchto vazbách má elektrostatický charakter. Typická podoba této vazby je zobrazena na obr. 1.2.5. [3]

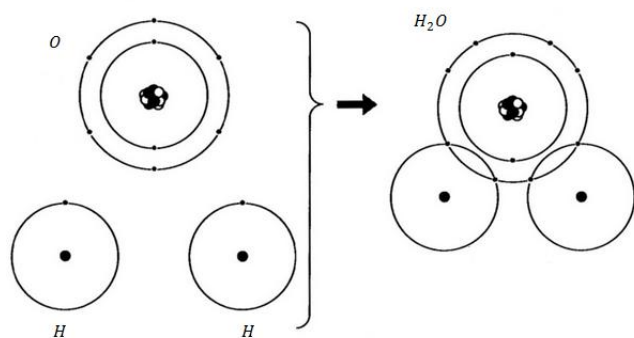


Obr. 1.2.5 Kovová vazba [8]

Sekundární vazby jsou vodíková a Van der Waalsova. Tyto vazby mají mnohem menší vazebné síly mezi částicemi než primární vazby. [3]

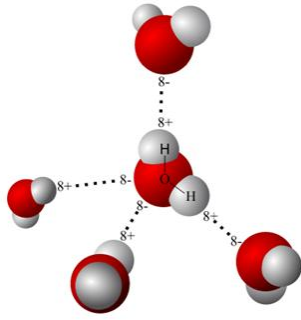
Vodíková vazba se vytváří mezi polárními vazbami obsahujícími vodík. Například molekula vody se skládá z vodíku ( $\epsilon_r \cong 1$ ), který je kovalentně vázán na kyslík ( $\epsilon_r \cong 1$ ), který je silně elektronegativní. Molekula vody ( $\epsilon_r \cong 80$ ) je hodně polární a její vznik je zachycen na (obr. 1.2.6). Podstatou poměrně slabých vodíkových vazeb je elektrostatická síla, která přitahuje kladnou vodíkovou část jedné molekuly k záporné kyslíkové části jiné molekuly. Vodíková vazba je zobrazena na obr. 1.2.7. Izolační schopnosti má pouze destilovaná voda. [3, 16, 31]

Van der Waalsova vazba se vyskytuje u mnoha látek, které mají kovalentní charakter jejich vnitřních vazeb. Síly, které působí mezi jádry a valenčními elektrony sousedních molekul, jsou v této vazbě silnější než síly, které působí mezi elektrony ve valenční slupce. Například u grafitu ( $\epsilon_r \cong 15$ ) jsou atomy uhlíku vázány kovalentními vazbami do pravidelných šestiúhelníků. Jednotlivé vrstvy jsou pak vázány slabou van der Waalsovou vazbou, což má za následek, že se grafit (tuha) lehce otírá (obr. 1.2.8). Grafit má sice poměrně vysokou hodnotu relativní permitivity, ale nejedná se o izolant. [3, 16, 31]

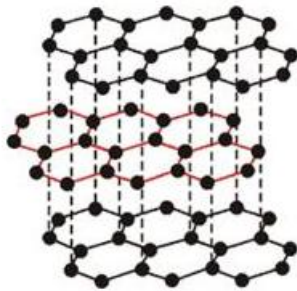


Obr. 1.2.6 Vznik molekuly vody [9]





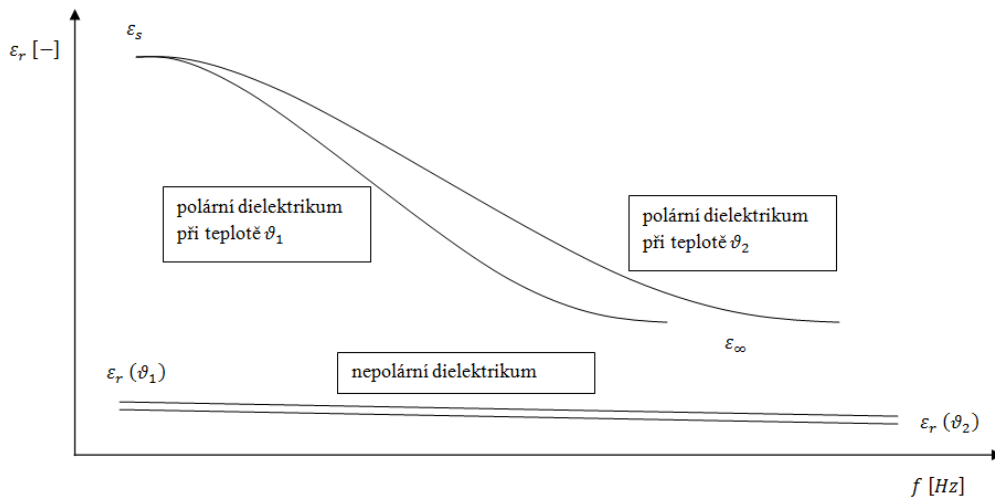
Obr. 1.2.7 Vodíkové vazby mezi molekulami vody [32]



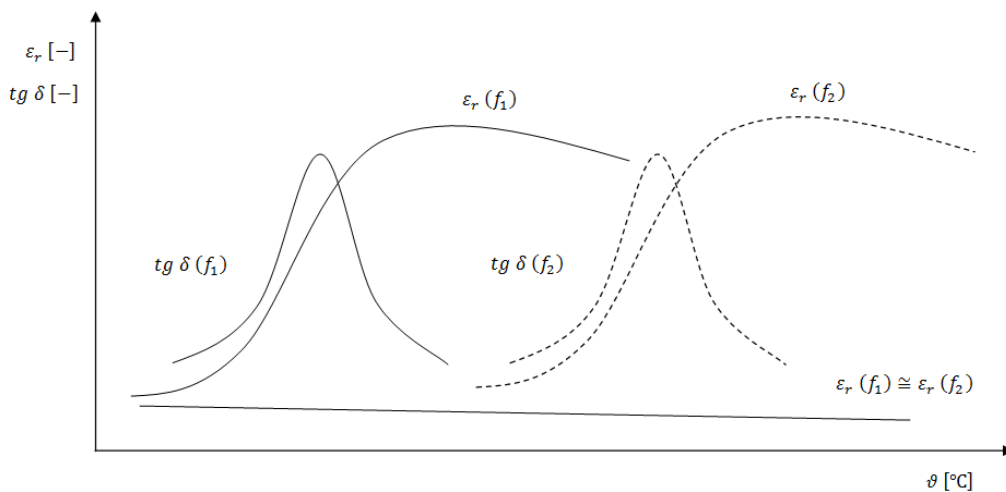
Obr. 1.2.8 Van der Waalsova vazba grafitu [10]

Samozřejmě polárnost či nepolárnost také závisí na prostorovém uspořádání atomů a jejich složitosti. Iontová vazba ze dvou atomů vždy vytvoří polární molekulu, ale molekula, která je tvořená z více než dvou atomů v iontové vazbě, tak polární být může i nemusí. Polárnost této molekuly závisí na vzájemné orientaci jednotlivých vazeb mezi ionty. Z kovalentní vazby ze dvou atomů, které mají dokonalé symetrické uspořádání elektronových obalů, vznikne nepolární molekula. Jestliže však je symetrie elektronových obalů atomů porušena, těžiště záporného a kladného elektrického náboje již nesplývají a jedná se tedy o polární molekulu. Z toho plyne, že výsledný směr molekuly je dán vektorovým součtem všech dílčích dipólů v molekule. [2]

Polárnost či nepolárnost dielektrika je velice důležitá pro určení jeho chování ve vnějším elektrickém poli. Polárnost dielektrik úzce souvisí s polarizacemi, které uvnitř dielektrika probíhají po přiložení vnějšího elektrického pole. Hodnota relativní permitivity a velikost dielektrických ztrát také souvisí s polárností dielektrika. Na obr. 1.2.9 je zobrazena frekvenční závislost relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika při dvou teplotách ( $\vartheta_1 < \vartheta_2$ ) a konstantním napětí a na obr. 1.2.10 je zobrazena teplotní závislost ztrátového činitele a relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika získaná při dvou frekvencích ( $f_1 < f_2$ ) při konstantním napětí. [2]



Obr. 1.2.9 Frekvenční závislost relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika při dvou teplotách ( $\vartheta_1 < \vartheta_2$ ) a konstantním napětí



Obr. 1.2.10 Teplotní závislost ztrátového činitele a relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika získaná při dvou frekvencích ( $f_1 < f_2$ ) při konstantním napětí

U dielektrik existuje fyzikálně velice zajímavá a výrazná součinnost mezi teplotními a frekvenčními závislostmi relativní permitivity a ztrátového činitele. [15]

### Závislost relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika na frekvenci

Frekvenční závislost relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika je zobrazena na obr. 1.2.9. U nepolárních dielektrik probíhají jen deformační polarizace (velmi rychlé), což se makroskopicky projevuje frekvenční a teplotní nezávislostí relativní permitivity a ztrátového činitele. [15]

U polárních dielektrik je tomu jinak. Čas a energie, které jsou potřebné k natočení dipólů do krajních poloh, jsou silně závislé na prostředí, kde se polarizace odehrává. Hlavní roli hraje vnitřní viskozita. Vnitřní viskozita závisí na přitažlivých silách mezi molekulami (dipóly) a určuje možnosti natáčení těchto dipólů do směru pole. To je důvod, proč obecně kapalná dielektrika dosahují vyšší hodnoty relativní permitivity než dielektrika pevná. Rozlišují se silně a slabě vázané nosiče náboje. Jedná se o molekuly, které jsou k sobě vázány různě silně. Silně vázané nosiče náboje se nepatrně otáčejí ve směru pole, zatímco u slabě vázaných nosičů dochází k mnohem většímu otočení do směru působení v tomto případě střídavého pole. Vnitřní viskozita je silně závislá na teplotě. Chování dipólů ovlivňuje v těsné souhře s teplotou i kmitočet. Při nízkém kmitočtu se dipóly stačí natočit do krajních poloh a tím pádem je polarizace a tím i relativní permitivita velká. Při vzrůstajícím kmitočtu se dipóly do krajních poloh nestačí natočit a polarizace a relativní permitivita klesá. Při vzrůstu teploty se sníží i vnitřní viskozita a dipóly jsou tak schopné sledovat rychlejší změny vnějšího střídavého elektrického pole. Z *obr. 1.2.9* je jasně vidět, že při snížení vnitřní viskozity dojde k posunutí křivky do oblasti vyšších frekvencí. [15]

### **Závislost relativní permitivity polárního a nepolárního dielektrika na teplotě**

Závislost ztrátového činitele a relativní permitivity u polárního a nepolárního dielektrika na teplotě je zobrazena na *obr. 1.2.10*. V tomto obrázku je zobrazena teplotní závislost relativní permitivity polární látky, která je vyjádřena při určité frekvenci  $f_1$ . V určitém teplotním rozmezí dochází ke značnému růstu relativní permitivity. S vzrůstem teploty se totiž snižuje vnitřní tření v látce a dipóly se tak snadněji otáčejí o větší úhel, čímž polarizace roste. Dipóly jsou vystaveny účinkům vnějšího střídavého elektrického pole a jejich vlastnímu chaotickému tepelnému pohybu. Chaotický tepelný pohyb přímo souvisí s teplotou a při vzrůstající teplotě stále více překáží organizovanému natáčení dipólů podle směru vnějšího střídavého elektrického pole. Od jisté teploty se proto relativní permitivita začíná snižovat. Pokud se zvýší frekvence z  $f_1$  na  $f_2$  mohou se dipóly lépe orientovat pouze v prostředí, které jim klade menší odpor. Teplotní závislosti relativní permitivity se posouvají při rostoucí frekvenci doprava, protože zvýšením teploty se dosáhne snížení vnitřní viskozity prostředí. [15]

U nepolárních dielektrik je situace naprosto odlišná. Relativní permitivita těchto dielektrik se s teplotou téměř nemění, protože permanentní dipóly zde nejsou a elektronová polarizace je na teplotě nezávislá. Nepatrný lineární pokles relativní permitivity u těchto

dielektrik je způsoben roztažností látek. Se vzrůstem teploty se vlivem roztažnosti snižuje počet atomů v jednotce objemu, čímž klesá ve vnějším střídavém elektrickém poli počet indukovaných dipólů. Tato změna je v porovnání se změnami, které nastávají u polárního dielektrika, nepatrná. Protože velikost relativní permitivity nepolárních látek nezávisí na frekvenci, není ani teplotní závislost relativní permitivity frekvencí ovlivněna. [15]

### **Závislost ztrátového činitele polárního dielektrika na teplotě**

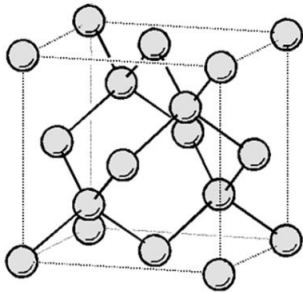
Závislost ztrátového činitele polárního a nepolárního dielektrika na teplotě je také zobrazena na *obr. 1.2.10*. U nepolárního dielektrika jsou dielektrické ztráty, které jsou způsobeny pouze polarizací atomů, zanedbatelné a tedy ztrátový činitel je také téměř nulový (není zobrazen). Vodivostní ztráty nejsou uvažovány. U polárního dielektrika je změna ztrátového činitele velká a prakticky i teoreticky významná. Jak je vidět z *obr. 1.2.10*, tak dochází v poměrně malém teplotním rozmezí k rychlému růstu a poté k rychlému poklesu ztrátového činitele, přičemž vrchol křivky se nachází v místě největšího růstu relativní permitivity. Tato poloha není náhodná. Při nízké teplotě je viskozita látky vysoká a dipóly se obtížně pohybují (jsou jakoby zatuhlé). Malý rozkmit dipólů vede k malé velikosti relativní permitivity a k malé spotřebě energie, proto je malý i ztrátový činitel. Když teplota roste, snižuje se viskozita a natočení dipólů se zvětšuje, vzrůstá polarizace a s ní i relativní permitivita. Výrazně se zvedají dielektrické ztráty a ztrátový činitel dosáhne svého maxima. Je to z toho důvodu, že prostředí má stále ještě vysokou hodnotu vnitřní viskozity a klade dipólům při jejich již větších výchylkách stále ještě poměrně velký odpor. Během dalšího růstu teploty poklesne viskozita a dipóly, když zvětšují svůj rozkmit, překonávají menší odpor. Ztrátový činitel proto klesá k minimu. Vodivostní ztráty nejsou uvažovány. [15]

### **1.2.3 Rozdělení pevných dielektrik podle struktury**

Pevná dielektrika se rozdělují na krystalická, amorfní a částečně krystalická. Vnitřní struktura dielektrika je rozhodujícím faktorem pro určení jeho podstatných vlastností. Všechna dielektrika jsou vlastně látkovými systémy, ve kterých jsou vzájemně vázané atomy a molekuly. Soudržnost mezi těmito částicemi zajišťují již zmíněné vazebné síly. Jedná se tedy o již zmíněné vazebné síly iontovou, kovalentní, kovovou, van der Waalsovou a vodíkovou. [3]

Krystalická dielektrika zachovávají pravidelnost na velkou vzdálenost. Částice, které vytvářejí krystal, jsou zvláštním způsobem uspořádány v prostoru. Pravidelné vnitřní

uspořádání se projeví i navenek a to krystalovým pravidelným tvarem. Typická krystalická struktura je zobrazena na *obr. 1.2.11* a jedná se o diamant ( $\epsilon_r = 5,5$ ). Atomy uhlíku se uvnitř diamantu vážou mezi sebou kovalentními vazbami. Krystalická dielektrika mají přesný bod tání, protože vazebné síly mezi částicemi jsou téměř stejné. [3]



*Obr. 1.2.11* Krystalická struktura diamantu [11]

Amorfni dielektrika zachovávají pravidelnost pouze na malou vzdálenost. Amorfni dielektrikum má částice v prostoru uspořádány nepravidelně. Tyto dielektrika se tak blíží ke kapalinám. Amorfni dielektrika nemají nějaký přesný bod tání, ale měknou postupně. Toto postupné měknutí vychází z toho, že existují mezi jednotlivými částicemi různé vazebné síly. Pokud se dielektrikum ohřívá, rozruší se nejdříve nejslabší vazby. Typická amorfni dielektrika jsou skla a jejich relativní permitivita ( $\epsilon_r = 3,8 - 19$ ) závisí na druhu skla. [3]

Existují případy, kdy amorfni dielektrikum lze převést na krystalické a naopak. Amorfni dielektrikum převedeme do krystalického stavu relativně dlouhým udržováním dielektrika na vysoké teplotě. Z krystalického dielektrika lze udělat amorfni dielektrikum například roztavením krystalu křemene a jeho následným rychlým ochlazením. Tavený křemen má  $\epsilon_r = 3,8$  a normální křemen  $\epsilon_r = 4,3 - 4,7$ . Dielektrikum v krystalickém stavu je vždy stabilnější než dielektrikum v amorfni stavu. [3]

V částečně krystalické struktuře dielektrika se vyskytuje krystalický i amorfni stav. Krystalická fáze dodává dielektriku tvrdost, odolnost, mechanickou pevnost a odolnost proti různým chemickým činitelům. Amorfni fáze dodává dielektriku ohebnost, pružnost, houževnatost, pružnost a odolnost proti nárazu. Přejchod mezi těmito dvěma stavy je plynulý a neexistuje tak přesné rozhraní. Krystalické a amorfni oblasti nelze od sebe oddělit chemicky ani fyzikálně, a proto jednotlivá molekula může, ale nemusí, náležet ke krystalické a zároveň amorfni oblasti a postupně jimi procházet. [3]

Rozdělení dielektrik na krystalické a amorfni je možno účelně rozšířit podle toho, zda existuje v jejich struktuře střed souměrnosti nebo neexistuje. Jestliže střed souměrnosti struktury existuje, pak se dielektrikum nazývá krystalické, jestliže střed souměrnosti struktury neexistuje, je dielektrikum nazváno amorfni. Toto rozdělení má svoje opodstatnění, protože existuje několik dielektrik se zvláštními vlastnostmi (piezoelektrika, pyroelektrika, elektroelektrody, fotoelektrody). [2]

### **1.3 Polarizace dielektrika**

Struktura dielektrika rozhoduje o tom, jak bude probíhat polarizace a většinou probíhá v dielektriku více polarizačních mechanismů současně. Celková polarizace se rovná součtu jednotlivých polarizací probíhajících v dielektriku. Základní rozdělení polarizací je dáno tím, zda polarizace probíhají s působením vnějšího pole nebo bez jeho působení. [2]

#### **1.3.1 Polarizace dielektrika s působením vnějšího elektrického pole**

Tato polarizace je způsobena vnějším elektrickým polem. Může se jednat o pole stejnosměrné (stacionární) a střídavé (nestacionární). Dále ještě existuje pole elektrostatické. Všechny tři případy jsou popsány v následujících kapitolách. V dielektriku, na které působí vliv kterékoliv z těchto tří polí, probíhají polarizace. Je zřejmé, že dielektrikum vložené třeba do stejnosměrného pole se bude chovat jinak než dielektrikum vložené do pole střídavého. V následujících podkapitolách jsou popsány mechanismy, které v dielektriku probíhají, když je vystaveno účinkům těchto polí. [2, 3]

Pokud se dielektrikum vloží do vnějšího stejnosměrného nebo střídavého pole, jsou volné i vázané nosiče náboje přitahovány k elektrodám, které jsou nabity opačně než tyto nosiče. Tímto způsobem dochází k určitému posunutí elektrických nábojů v dielektriku a dojde tak k polarizaci. Mechanismů polarizace je velké množství a probíhají většinou v dielektriku současně. Jedná se o velice komplexní problematiku, a proto pro přehlednost jsou následující jevy popsány pro stejnosměrné pole. Pokud se nějaký jev nebo děj bude týkat jiného druhu pole, je to v textu uvedeno. [2, 3]

Dielektrikum v ideálním případě nevede elektrický proud, protože uvnitř neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje a obsahuje pouze nosiče vázané. Vzájemná interakce mezi elektrickým polem a dielektrikem začne v okamžiku, kdy toto dielektrikum vložíme do elektrického pole. V tomto okamžiku se v dielektriku začnou dít takzvané polarizační

procesy. Dielektrikum je totiž aktivní látka, která má schopnost vytvořit vlastní vnitřní elektrické pole. Polarizační procesy lze zkoumat ze dvou základních přístupů a jedná se o makroskopický (fenomenologický) přístup a mikroskopický (strukturální) přístup. [2, 3, 4]

### 1.3.1.1 Makroskopický přístup

Dielektrikum je posuzováno jako určitý objekt jasně daných rozměrů a hodnotí se pouze vnější projevy polarizačních procesů. V tomto případě jsou podstatné vzájemné interakce mezi dielektrikem a jeho okolím a nedůležité jsou děje, které probíhají ve vnitřní struktuře dielektrika. V tomto přístupu je důležitý pouze celkový výsledek polarizace, který se projeví tak, že vzniknou vázané elektrické náboje na povrchu zkoumaného dielektrika a to vede ke vzniku celkového dipólového momentu sledovaného dielektrika. [2, 3]

Zpolarizované dielektrikum je z makroskopického hlediska popsáno vektorem polarizace  $\vec{P}$  [ $C \cdot m^{-2}$ ]. Vektor polarizace se určí ze vztahu:

$$\vec{P} = \frac{\vec{M}}{V} \quad (1.3.1)$$

$\vec{M}$  [ $C \cdot m$ ] je celkový dipólový moment zorientovaný ve směru pole a  $V$  [ $m^3$ ] je objem dielektrika. [2, 3]

Mezi vektorem polarizace a intenzitou elektrického pole existuje vztah:

$$\vec{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.3.2)$$

$\vec{E}$  [ $V \cdot m^{-1}$ ] je vektor elektrické intenzity a elektrická intenzita je obecně fyzikální veličina, která vyjadřuje směr a velikost vnějšího elektrického pole,  $\kappa$  [–] je dielektrická susceptibilita nebo koeficient polarizace (pro vakuum a vzduch je 0 a pro ostatní látky je vyšší),  $\epsilon_0$  [ $F \cdot m^{-1}$ ] je permitivita vakua, její velikost je  $8,854 \cdot 10^{-12}$  a jedná se o smluvenou hodnotu. [2, 12]

Pro výpočet vektoru elektrické indukce platí vztahy:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (1.3.3)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (1.3.4)$$

$\vec{D}$  [ $C \cdot m^{-2}$ ] je vektor elektrické indukce a elektrická indukce je obecně fyzikální veličina, která popisuje účinky vnějšího elektrického pole v dielektriku,  $\varepsilon$  [ $F \cdot m^{-1}$ ] je permitivita dielektrika ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ) a obecně vyjadřuje schopnost látky se polarizovat. [2, 13]

Vztah pro relativní permitivitu ( $\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$ ) vyjadřuje určitou míru změny kapacity kondenzátoru, jestliže mezi elektrody tohoto kondenzátoru se umístí místo vakua (ve vakuu nemůže docházet k polarizaci) nějaké reálné dielektrikum (dochází v něm k polarizacím). Relativní permitivita vyjadřuje, kolikrát se v tomto případě zvětší kapacita kondenzátoru. Jedná se o makroskopickou veličinu, která poskytuje určitou kvantitativní informaci o složitých vnitřních pochodech v dielektriku. Relativní permitivity různých dielektrik mohou mít různou velikost. Některá dielektrika jsou uvedena v tabulce *tab. 1.3.1*. [2, 3, 14, 15]

<b>Materiál</b>	$\varepsilon_r$
destilovaná voda	80
polystyren	2,6
papír	3,5
porcelán	6,5
slída	7
sklo	7,6
křemík	12
speciální keramické materiály	až $10^5$

*Tab. 1.3.1 Relativní permitivity některých dielektrik [14]*



Dosadí-li se rovnice (1.3.4) a (1.3.2) do rovnice (1.3.3) vyjde rovnice:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \kappa \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.3.5)$$

Po jednoduchých matematických úpravách rovnice (1.3.5) vyjde rovnice ( $\varepsilon_r = 1 + \kappa$ ). Jednou z nejdůležitějších veličin při makroskopickém pohledu na chování dielektrika je relativní permitivita. [2]

### 1.3.1.2 Mikroskopický přístup

Tímto přístupem se sledují změny, které vzniknou ve struktuře dielektrika. Mikroskopický přístup se tedy zabývá vnitřní strukturou dielektrika a poskytuje znalosti o dějích uvnitř dielektrika, které se pak projevují navenek jako makroskopické jevy. Na struktuře dielektrika závisí rychlost a možnost pohybu vázaných i volných částic posouvat a pohybovat se. Projevem mikroskopické polarizace je vznik nových dipólových momentů nebo posunutí orientace stávajících dipólových momentů. [2, 3]

#### Vznik nových dipólů

K vzniku nových dipólů dojde k okamžiku, kdy dojde k působení vnějšího elektrického pole na dielektrikum. Nové dipóly se také někdy nazývají indukované dipóly. Jestliže tedy působí vnější elektrické pole, těžiště kladného a záporného náboje zaujmou novou rovnovážnou polohu. Původně tato těžiště splývala a nyní mají své nové rovnovážné polohy v určité vzájemné vzdálenosti od sebe. Po skončení působení vnějšího elektrického pole se tyto indukované dipóly vrací na svá původní místa. Jedná se o nepolární dielektrikum. [2]

#### Orientace stávajících dipólů

V případě posunutí orientace stávajících dipólů, tak samozřejmě vlivem vnějšího elektrického pole nové dipóly nevznikají. Pouze se již stávající dipóly orientují (natáčí) souhlasně se směrem onoho působícího vnějšího elektrického pole. Dipóly také částečně mění i svojí velikost. Jedná se o polární dielektrikum. [2]

## Polarizovatelnost dielektrika

Zpolarizované dielektrikum je z mikroskopického hlediska popsáno takzvanou polarizovatelností, která udává míru elektrizování daného dielektrika a značí se  $\vec{\alpha}$ . Polarizovatelnost udává určitou míru změny v systému dielektrika ve vnějším elektrickém poli (dochází k polarizování), oproti stejnému dielektriku mimo elektrické pole. Indukovaný dipólový moment částice se značí  $\vec{\mu}$  a jeho jednotky jsou  $[C \cdot m]$ . Tento indukovaný dipólový moment částice se vypočte ze vztahů:

$$\vec{\mu} = \alpha \cdot \vec{E}_L \quad (1.3.6)$$

$$\vec{\mu} = q \cdot \vec{d} \quad (1.3.7)$$

Řeckým písmenem  $\alpha [F \cdot m^2]$  se značí již zmíněná polarizovatelnost,  $q [C]$  je velikost náboje,  $\vec{d} [m]$  je orientovaná vzdálenost posunutí nábojů,  $\vec{E}_L [V \cdot m^{-1}]$  je intenzita elektrického pole, která působí v místě konkrétního dipólu. [2, 3]

K určení relativní permitivity na základě mikroskopických veličin je třeba znát nejen polarizovatelnost dielektrika, ale také intenzitu lokálního pole ( $\vec{E}_L$ ). Intenzita  $\vec{E}_L$  vyjadřuje intenzitu elektrického pole přímo v místě konkrétního dipólu a respektuje vzájemné interakce částic daného dielektrika. Její určení je dosti složité a závisí na konkrétní struktuře dielektrika. Každé dielektrikum se skládá z obrovského množství částic, které se navzájem ovlivňují. [2, 3, 4]

Konečný vztah pro intenzitu lokálního pole, který vyjadřuje spojení makroskopického a mikroskopického pohledu na polarizaci, se vypočítá rovnicí:

$$\vec{E}_L = \frac{\epsilon_r + 2}{3} \cdot \vec{E} \quad (1.3.8)$$

$\vec{E} [V \cdot m^{-1}]$  je vnější střední makroskopické pole,  $\epsilon_r [-]$  je relativní permitivita prostředí a platí, že pokud se relativní permitivita rovná jedné (vakuum, vzduch), intenzita vnějšího středního makroskopického pole a lokálního pole se rovnají. [2]

V případě předpokladu, že v objemu daného dielektrika je pouze jeden druh vázaných nosičů elektrického náboje, lze pomocí polarizovatelnosti vyjádřit vektor polarizace daného dielektrika podle vztahu:

$$\vec{P} = n \cdot \vec{\mu} = n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L \quad (1.3.9)$$

Malé písmeno  $n [m^{-3}]$  vyjadřuje počet indukovaných dipólů, pro vektor polarizace platí vztah (1.3.2). Pro permitivitu platí ( $\epsilon_r = 1 + \kappa$ ). Z tohoto vzorečku lze vyjádřit dielektrickou susceptibilitu ( $\kappa = \epsilon_r - 1$ ). Pro polarizaci potom platí vztah:

$$\vec{P} = (\epsilon_r - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.3.10)$$

Jestliže se porovná rovnice (1.3.10) s rovnicí (1.3.9), získá se pomocí jednoduchých matematických úprav rovnice pro výpočet relativní permitivity:

$$\epsilon_r = 1 + n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L \cdot \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \vec{E}} \quad (1.3.11)$$

Rovnice (1.3.11) ukazuje vyjádření relativní permitivity pomocí mikroskopických veličin daného dielektrika. To také dokazuje vztah mezi mikroskopickým a makroskopickým přístupem, protože relativní permitivita je nejdůležitější veličinou pro charakteristiku makroskopického pohledu na dielektrikum. [2, 3]

### 1.3.1.3 Mechanismy polarizací a jejich druhy

Jak bylo řečeno, vlivem přiloženého vnějšího elektrického pole jsou nosiče elektrického náboje dielektrika přitahovány k opačně nabitým elektrodám a dochází k natočení nebo pohybu těchto nábojů. Může se jednat o silně nebo slabě vázané nosiče náboje (molekuly) nebo o nosiče zcela volné (obecně elektrony a ionty). Natočení nebo pohybu nosičů náboje však brání jejich vlastní tepelný pohyb nebo vazebné síly (velikost vnitřní viskozity) mezi nimi. O průběhu polarizace hlavně rozhoduje struktura dielektrika. Podle vazebních sil nosičů náboje je polarizace rozdělena na deformační (pružnou, posuvnou), relaxační (orientační, nepružnou) a migrační (objemovou, prostorovým nábojem).

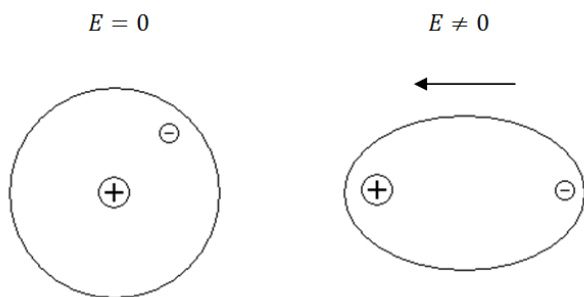
Deformační polarizace se dělí na elektronovou polarizaci, iontovou polarizaci a polarizaci pružně vázaných dipólových momentů. Relaxační polarizace se dělí na iontovou relaxační polarizaci a dipólovou relaxační polarizaci. [2, 3]

### **Deformační polarizace**

Tyto polarizace jsou velice rychlé a prakticky nezávisí, vzhledem k velikosti vazebných sil nosičů náboje (silně vázané), na vnějších podmínkách prostředí jako je teplota, tlak nebo frekvence. Posuv nosiče elektrického náboje vzniká tím, že přiložíme vnější elektrické pole. Krátké časy polarizace jsou způsobeny právě tou pevnou vazbou a navrácení nosičů elektrického náboje do původní polohy (pružnost vazby), když přestane působit vnější elektrické pole, je rovněž velmi rychlé. Ovlivnění výsledné relativní permitivity dielektrika může však být značné, i když dochází pouze k malému posunutí nosičů náboje, protože toto malé posunutí nastává u velkého množství nosičů. Vzhledem k pevné vazbě částic, které se účastní polarizace, není malé natáčení nosičů náboje ovlivňováno jejich tepelným pohybem. Deformační polarizace jsou bezetrátové a dělí se na elektronovou polarizaci, iontovou polarizaci a polarizaci pružně vázaných dipólových momentů. [2, 3, 4]

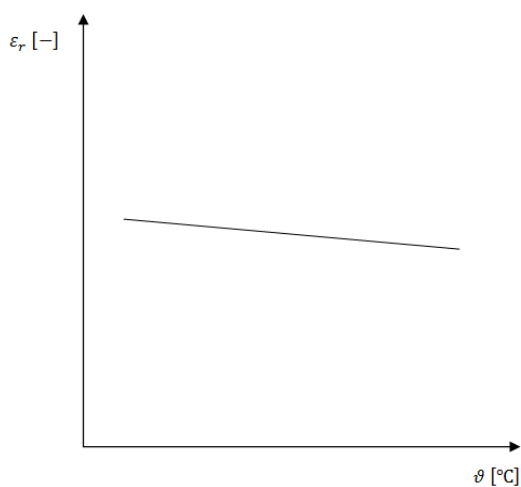
### **Elektronová polarizace**

Tato polarizace probíhá hlavně u nepolárního dielektrika. Vlivem působení vnějšího elektrického pole dojde k posunu atomových jader ve směru působení vnějšího elektrického pole a elektrony se posunou v opačném směru, což ukazuje *obr. 1.3.1*. Toto posunutí je poměrně malé a nepřesahuje rozměry atomu, protože takzvané vazebné síly mezi jádrem a elektronem jsou zde značné. Z makroskopického (fenomenologického) hlediska se pak atomy jeví jako elementární dipóly, které jsou orientovány ve směru působení vnějšího elektrického pole. Tyto elementární dipóly mají svůj indukovaný dipólový moment, jehož velikost závisí na polarizovatelnosti látky a také na velikosti lokálního pole. [2, 3, 4]



Obr. 1.3.1 Elektronová polarizace atomu vodíku [30]

Doba ustálení do nové rovnovážné polohy je u tohoto typu polarizace  $10^{-16}$  až  $10^{-13}$  sekundy (velmi rychlá), a proto je tato polarizace nezávislá na frekvenci. Jelikož tento polarizační děj probíhá uvnitř atomů, není ovlivňován jejich tepelným pohybem. Z výše uvedeného vyplývá, že se jedná o polarizaci, kde nedochází ke ztrátě energie. Je třeba zdůraznit, že elektronová polarizace probíhá ve všech skupenstvích (pevné, kapalné, plynné) a ve všech látkách. Teplotní závislost relativní permitivity dielektrika při elektronové polarizaci je zobrazena na obr. 1.3.2. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a frekvence byly po dobu měření konstantní. [2, 3, 4]

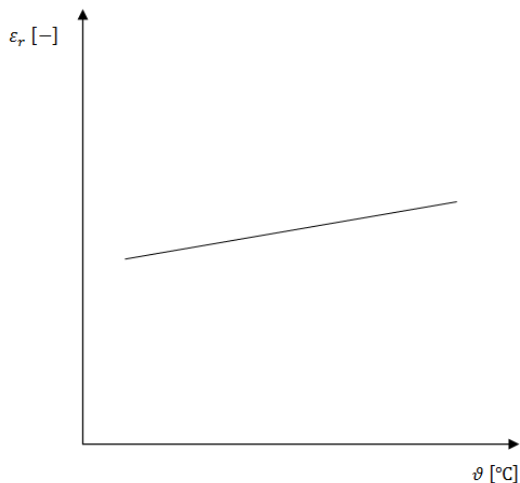


Obr. 1.3.2 Teplotní závislost relativní permitivity dielektrika při elektronové polarizaci (napětí a frekvence je konstantní)

## Iontová polarizace

Tato polarizace probíhá jen u polárního dielektrika s čistě iontovou vazbou. Naprosto čistá iontová vazba neexistuje, a tak se iontová polarizace netýká celé struktury dielektrika, ale jen jeho určité části. Tato polarizace se projevuje tam, kde jsou čisté iontové krystaly. Čisté iontové krystaly (molekuly) mají mřížku tvořenou jen ionty. Mřížky složené z kladných iontů a mřížky složené ze záporných iontů jsou k sobě poutány elektrostatickou silou. Například by se takto zpolarizoval krystal kamenné soli ( $NaCl$ ), jehož mřížka by byla ideálně tvořena stejným počtem iontů  $Na^+$  a  $Cl^-$ . Největším rozdílem mezi iontovou a elektronovou polarizací je existence jistých dipólů bez přiložení vnějšího elektrického pole u iontové polarizace. Tyto dipóly jsou důsledkem struktury dielektrika, které je tvořené iontovými krystaly. Jestliže začne působit, na tyto dipóly (molekuly) vnější elektrické pole, natočí se podle směru působícího vnějšího elektrického pole. Tyto dipóly tedy mění svůj směr působení podle směru vnějšího elektrického pole a částečně mění i svojí velikost. Ionty jsou vázány v uzlech krystalové mřížky velmi silně, a tak se dipóly natáčí do směru pole a mění svojí velikost minimálně. [2, 3, 4, 28]

Doba ustálení se u iontové polarizace pohybuje v rozmezí  $10^{-13}$  až  $10^{-12}$  sekund. Doba ustálení je tedy o něco větší než u elektronové polarizace. Iontová polarizace je rovněž téměř frekvenčně a teplotně nezávislá a bezeztrátová. Teplotní závislost relativní permitivity dielektrika při iontové polarizaci je zobrazena na *obr. 1.3.3*. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a frekvence byly po dobu měření konstantní. [2, 3, 4]



Obr. 1.3.3 Teplotní závislost relativní permitivity dielektrika při iontové polarizaci (napětí a frekvence je konstantní)

### **Polarizace pružně vázaných dipólových momentů**

Svoji podstatou je polarizace pružně vázaných dipólových momentů velmi podobná iontové polarizaci. Tato polarizace se vyskytuje v pevných látkách, kde jsou dipóly (molekuly) vázány velice silnými vazbami a může dojít jen k malému natočení těchto dipólů do směru pole. Přiložením vnějšího elektrického pole opět dojde k malé změně směru a velikosti dipólů jako u iontové polarizace a při odebrání elektrického pole rovněž dojde k navrácení dipólů na původní místo. [2]

Polarizace pružně vázaných dipólových momentů je bezetrátová a doba ustálení se pohybuje v rozmezí  $10^{-13}$ - $10^{-12}$  sekund. Vlivem silné vazby mezi dipóly lze zanedbat jejich tepelný pohyb a polarizaci lze označit jako teplotně nezávislou. [2]

### **Relaxační polarizace**

Proběhne jen u polárních dielektrik a týká se celé jeho struktury. Tato polarizace se velmi liší od deformační (pružné, posuvné) polarizace. Na mechanismu těchto polarizací se totiž podílejí slabě vázané nosiče elektrického náboje, které se mohou poměrně dobře otáčet do směru přiloženého pole. Tyto slabě vázané nosiče mohou být například molekuly kapalných a plynných dielektrik. Kapalná nebo plynná dielektrika totiž nemají tak velkou vnitřní viskozitu struktury jako dielektrika pevná. Molekuly jsou pohyblivé relativně volně (např. molekuly vody). Natáčení molekul do směru pole však brání jejich chaotický tepelný pohyb, který roste s teplotou. Je třeba mít na paměti, že molekuly jsou sice relativně volně pohyblivé, ale obecně atomy, ze kterých se molekula skládá, jsou vázány pevně. I v pevných dielektrických materiálech se vyskytuje relaxační polarizace. V případě krystalických

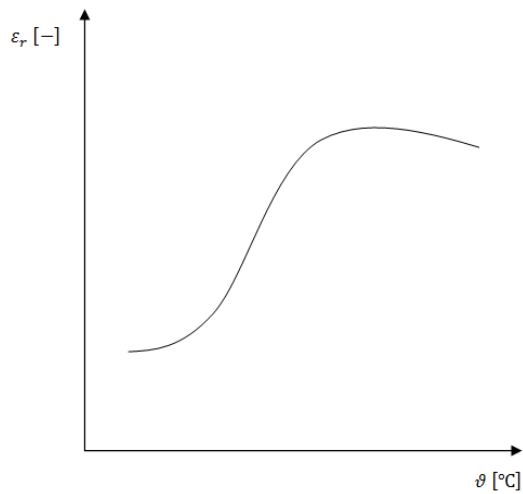
dielektrik se v jejich objemu vyskytují ionty příměsí nebo nečistot, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním částicím dielektrika. V amorfních dielektrických materiálech jsou slabě vázané částice náhodně rozprostřeny v celém objemu. [2, 3, 4]

Bez přítomnosti vnějšího elektrického pole nedochází k polarizaci. Tepelný pohyb slabě vázaných dipólů (molekul) dielektrika je chaotický. Všechny možné polohy těchto molekul jsou tedy stejně pravděpodobné, respektive tedy nedochází k jejich nerovnoměrnému rozložení. S přiložením vnějšího elektrického pole dojde ke změně silových poměrů v dielektriku. Stane se, že určité polohy se stanou pro slabě vázané molekuly energeticky výhodnější než jiné, a proto se natočí do těchto poloh. Tímto způsobem dojde k relaxační polarizaci a v jednotce objemu daného dielektrika vznikne dipólový moment. [2, 3, 4]

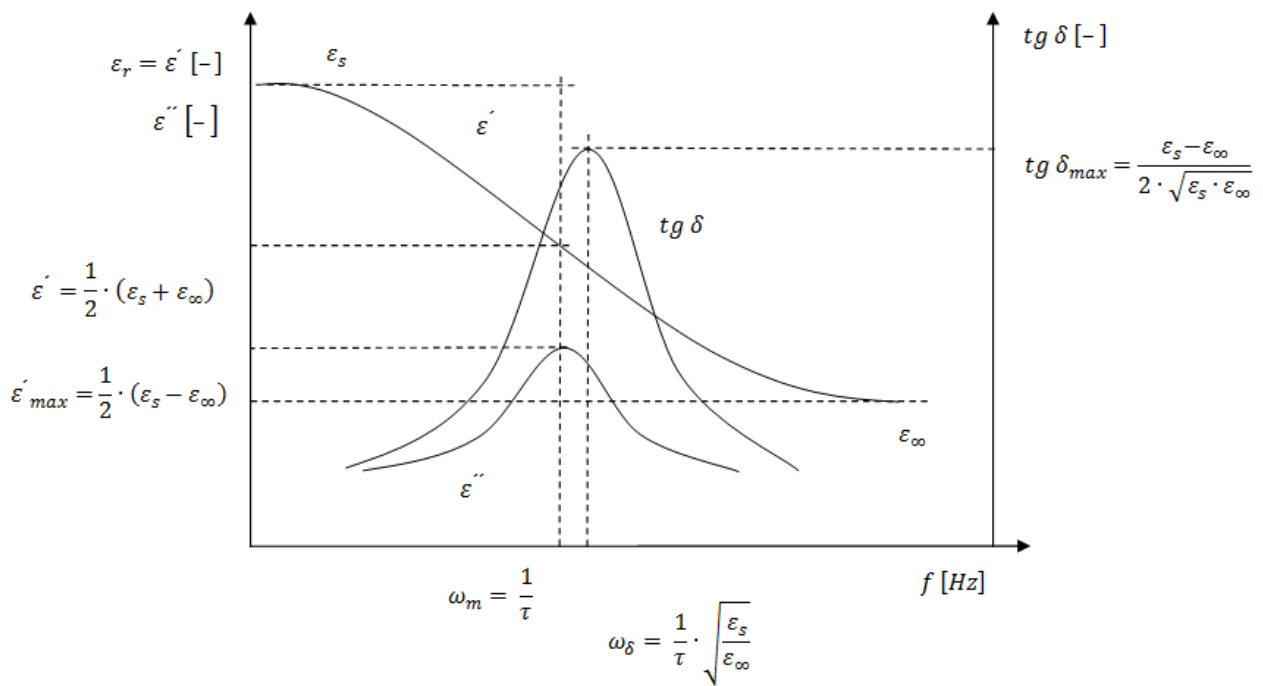
Přechod od nezpolarizovaného dielektrika k zpolarizovanému dielektriku nastane okamžitě po přiložení vnějšího elektrického pole. Tento přechod však trvá určitou dobu (relaxační doba). Celý proces relaxační polarizace silně závisí na vnějších podmínkách (teplota, tlak, frekvence) a má exponenciální průběh. Po skončení působení elektrického pole se dipóly (molekuly) vracejí do svých výchozích poloh (pružnost vazby) vlivem jejich vlastního tepelného pohybu a tento proces depolarizace má také exponenciální průběh. [2, 3, 4]

Relaxační polarizace je oproti deformačním polarizacím velice závislá na teplotě a je ztrátová. Rovněž časy ustálení jsou mnohem větší než u deformačních polarizací a zároveň jsou mnohem větší i vzdálenosti, o které se dipóly natočí. Relaxační polarizace se dělí na iontové relaxační polarizace a dipólové relaxační polarizace. Teplotní závislost relativní permitivity dielektrika při relaxační polarizaci je zobrazena na *obr. 1.3.4*. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a frekvence byly po dobu měření konstantní. Frekvenční závislost reálné složky komplexní permitivity (relativní permitivity), imaginární složky komplexní permitivity (míry ztrát) a ztrátového činitele při relaxační polarizaci ve střídavém poli je na *obr. 1.3.5*. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a teploty byly po dobu měření konstantní. V tomto případě vodivostní ztráty nejsou uvažovány. [2, 3, 4]





Obr. 1.3.4 Teplotní závislost relativní permitivity dielektrika při relaxační polarizaci (napětí a frekvence je konstantní)



Obr. 1.3.5 Frekvenční závislost reálné složky permitivity (relativní permitivity), imaginární složky permitivity (míry ztrát) a ztrátového činitele při relaxační polarizaci (napětí a teplota je konstantní)

## **Iontová relaxační polarizace**

K iontové polarizaci dochází u pevných dielektrik. Aby v objemu dielektrika došlo k iontové relaxační polarizaci, musí být buď složený z iontů, nebo musí v něm být přítomny alespoň nějaké ionty příměsí nebo nečistot, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním částicím dielektrika. Slabá vazba je pak příčinou velké citlivosti těchto iontů na působení vnějšího elektrického pole (snadno se natácejí do směru působení pole). Jedná se například o amorfni dielektrika, tvořené iontovou vazbou (anorganická skla) nebo o anorganické krystalické látky s iontovou vazbou a netěsným uložením částic. Společnou podstatnou vlastností těchto dielektrik je netěsnost vazeb, které váží jednotlivé částice struktury dielektrika. [2]

Iontová relaxační polarizace potřebuje určitý čas k tomu, aby se mohla ustálit ( $10^{-12}$  až  $10^{-8}$ ). Tato polarizace je frekvenčně i teplotně závislá. Přiložené vnější elektrické pole se snaží o určité uspořádání částic a chaotický tepelný pohyb těchto částic mu v tom brání. Čím je teplota vyšší, tím menší je vliv vnějšího elektrického pole na tyto částice. [2]

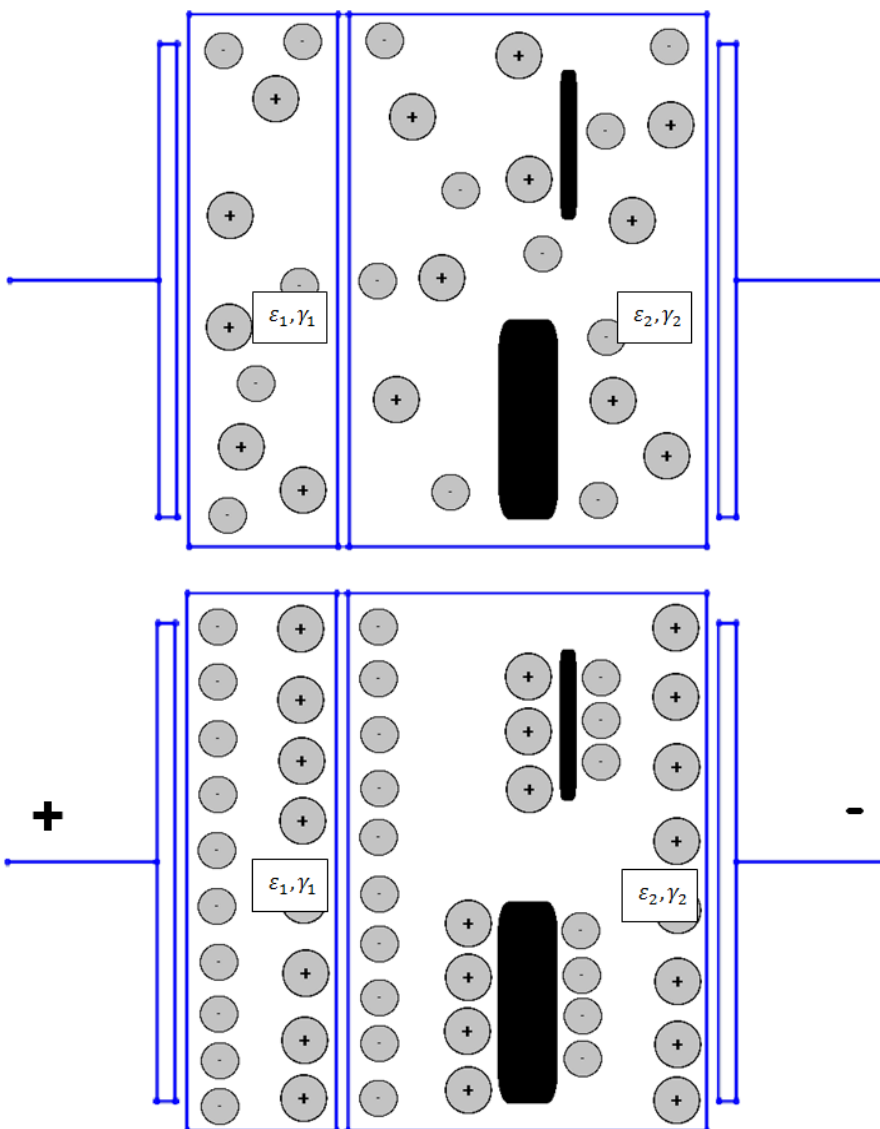
## **Dipólové relaxační polarizace**

Tato polarizace se objevuje v polárních dielektrických materiálech, které mají dipóly (molekuly) slabě vázané a snadno se tak natáčí do přiloženého pole. K dipólové relaxační polarizaci tedy často dochází u plynů a kapalin. V případě přiložení vnějšího elektrického pole dojde uvnitř dielektrika k energetickým změnám, které způsobí, že se některé polohy stanou pro dipóly energeticky výhodnější než jiné. Většina dipólů zaujme výhodnější polohy a dielektrikum tak získá makroskopický dipólový moment. Dielektrikum se zpolarizuje. Tato polarizace je velmi silně závislá na teplotě a frekvenci. Čas ustálení této polarizace je  $10^{-12}$  až  $10^{-8}$ . [2]

## **Migrační polarizace**

Kromě vázaných (silně nebo slabě) nosičů elektrického náboje se mohou polarizačních jevů účastnit i nosiče naprosto volné. Prostorový náboj, způsobený migrací volných nosičů, vzniká na nehomogenitám dielektrika. Volné nosiče elektrického náboje v dielektriku vznikají hlavně jejich vstřikováním z elektrod (např. elektrony), které přiléhají k danému dielektriku. Nehomogenita v dielektriku je například vzduchová bublinka, prasklina, nečistota a další podobná strukturální vady. Tyto oblasti mají jiné vlastnosti, než zbytek dielektrika

(permitivita, konduktivita). Na těchto nehomogenitách se po přiložení vnějšího elektrického pole zachycují volné nosiče elektrického náboje, které migrují v dielektriku. Volné nosiče elektrického náboje se na nehomogenitách snadno zachytí, protože se jedná o rozhraní dvou různých oblastí, kde mají tyto nosiče rozdílnou pohyblivost. Dochází tak ke kumulaci volných nosičů elektrického náboje na určitém místě. Ke kumulaci volných nosičů dochází i na rozhraní dvou dielektrik s rozdílnými vlastnostmi (vzniká prostorový náboj). Vznik prostorového náboje v nehomogenním dielektriku je zobrazen na *obr. 1.3.6.* a z makroskopického (fenomenologického) hlediska se to projeví jako polarizace dielektrika. [2]



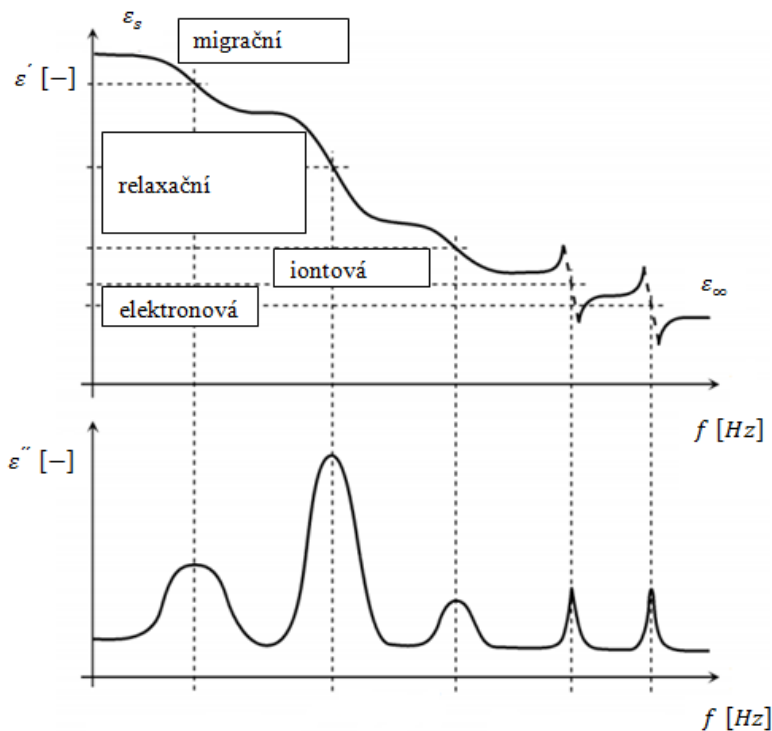
*Obr. 1.3.6 Vznik prostorového náboje v nehomogenním dielektriku*

Účinky prostorového náboje na dielektrikum jsou značně velké. Dokonce to může vést až ke snížení elektrické pevnosti dielektrika v porovnání s tabulkovou hodnotou a průrazu dielektrika při napětí, které by dielektrikum mělo za normálních okolností vydržet. [2]

Nejvýrazněji se prostorový náboj projevuje u vysokonapěťových zařízení a není důležité, zda se jedná o zařízení stejnosměrné nebo střídavé. V případě přiloženého střídavého pole se tento náboj nejvýrazněji projevuje v oblasti nízkých frekvencí. Migrační polarizace je pomalejší než relaxační (orientační, nepružná) a deformační (pružná, posuvná). Jedná se tedy o nejpomalejší polarizaci. Migrační polarizace jsou stejně jako relaxační polarizace ztrátové. Tento druh polarizace se vyskytuje u kompozitních dielektrik. Z hlediska této práce je to důležité, protože většina měřených dielektrik byly kompozity. [2]

### **Permitivita dielektrika v souvislosti s polarizacemi**

Průběh závislosti reálné a imaginární části komplexní permitivity je zobrazen jako dielektrické spektrum polárního dielektrika na *obr. 1.3.7*. Z grafu je vidět, že při nejnižších frekvencích přispívají k reálné složce permitivity všechny uvažované druhy polarizací. S rostoucí frekvencí nejprve ustává migrační polarizace a poté ustávají další polarizace tak, jak klesá schopnost částic sledovat změny vnějšího střídavého elektrického pole. Velikost imaginární složky permitivity v závislosti na frekvenci udává velikost ztrát v dielektriku v daném okamžiku. Z grafu je vidět, že největší ztráty vznikají při relaxační polarizaci a nejmenší při polarizaci elektronové. [2]



Obr. 1.3.7 Dielektrické spektrum polárního dielektrika (napětí a teplota je konstantní)

### 1.3.1.4 Dielektrikum v elektrostatickém poli

Vzhledem k zaměření této práce je elektrostatickému poli věnována pouze malá pozornost. Elektrostatické pole je elektrické pole, které vzniká v okolí elektrického náboje, který se nepohybuje. Elektrostatické pole je speciálním případem stejnosměrného elektrického pole. Stejnosměrné elektrické pole popisuje časově neměnné elektrické pole, ve kterém však mohou vznikat elektrické proudy. Tyto proudy vzniknou v důsledku pohybu elektrických nábojů. Elektrostatické pole je také časově neměnné elektrické pole, ve kterém však nevznikají elektrické proudy, protože se elektrické náboje nepohybují. Popisuje ho elektrická intenzita a elektrický potenciál a zobrazuje se siločárami. Zdroje elektrostatických sil jsou elektrické náboje, které vznikají například třením některých materiálů (např. ebonit). Relativní permitivita ebonitu je 2,5-5. Praktický příklad elektrostatického silového působení je přilnavost silikonového sáčku k ruce nebo vlasů k hřebenu při česání. Silové působení mezi částicemi, které vytvářejí vazbu, má také elektrostatický charakter. Relativní permitivita se v případě elektrostatických polí označuje jako statická relativní permitivita  $\epsilon_s$  [-]. [2, 5]

### 1.3.1.5 Dielektrikum ve střídavém (nestacionárním) elektrickém poli

Dielektrikum, které je umístěno do střídavého pole, se chová úplně jinak než v poli stejnosměrném. Zdroj střídavého napětí kondenzátor nabije (jako v poli stejnosměrném), pak se ale polarita zdroje změní a kondenzátor se napřed vybijí a zase nabije opačně. Kondenzátor

se periodicky nabíjí a vybíjí, obvodem prochází střídavý proud. Dielektrikem však v ideálním případě žádný proud neprochází. Celé praktické měření se měřilo střídavým napětím o amplitudě 5 voltů, a právě proto je střídavému poli v této práci věnována velká pozornost. [2]

Popis chování dielektrika ve střídavém poli je mnohem náročnější, protože je třeba vzít v úvahu kinetické vlastnosti částic. Setrvačnost částic je příčinou fázového zpoždění vektoru elektrické indukce  $\vec{D}(t)$  za vektorem intenzity elektrického pole  $\vec{E}(t)$  o úhel  $\delta$ . Předpokládá se, že přiložené střídavé napětí má ideální sinusový průběh. Pomocí symbolicko-komplexní metody se vyjádří vztah mezi vektorem intenzity středního makroskopického pole  $\vec{E}(t)$  a vektorem elektrické indukce  $\vec{D}(t)$ . Vektor elektrické indukce a vektor intenzity středního makroskopického pole se vypočítá ze vztahů:

$$\vec{D}(t) = \vec{D}m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (1.3.12)$$

$$\vec{E}(t) = \vec{E}m \cdot e^{j\omega t} \quad (1.3.13)$$

Písmenem  $m$  se značí maximální hodnoty daných veličin a pro různé frekvence se bude samozřejmě velikost vektoru elektrické indukce a vektoru intenzity středního makroskopického pole měnit. Dále platí vztah:

$$\vec{E}m \cdot e^{j\omega t} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) = \vec{D}m \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (1.3.14)$$

Po úpravě dostaneme, že:

$$\vec{E}m \cdot e^{j\omega t} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) = \vec{D}m \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-j\delta} \quad (1.3.15)$$

Člen  $e^{j\omega t}$  je možno na obou stranách rovnice vykrátit a pro rovnice platí vztah:

$$\vec{E}m \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(j\omega) = \vec{D}m \cdot e^{-j\delta} \quad (1.3.16)$$

Vztah (1.3.16) je podobný vztahu (1.3.4). Rozdíl je ve fázovém posunu  $\delta$  a ve vyjádření relativní permitivity. V případě střídavých polí se totiž zavádí frekvenčně závislá komplexní relativní permitivita, pro kterou platí vztah:

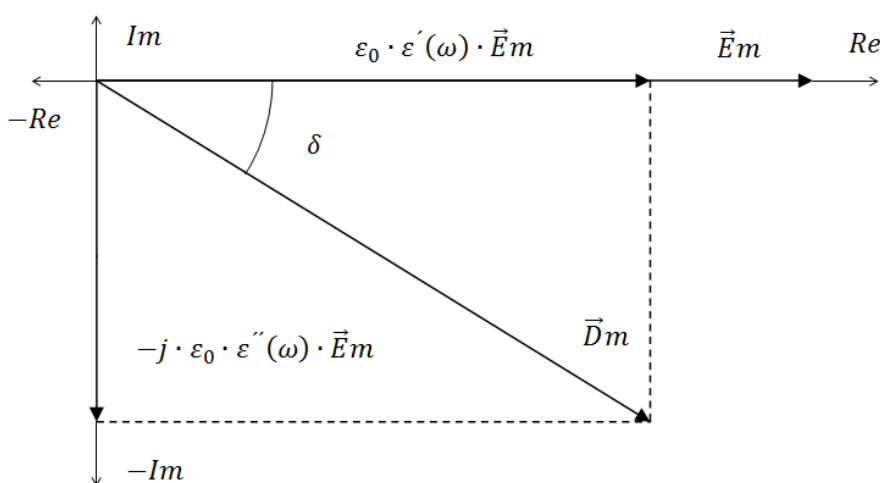
$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (1.3.17)$$

$\varepsilon'(\omega)$  [–] je frekvenčně závislá reálná část komplexní permitivity a  $\varepsilon''(\omega)$  [–] je frekvenčně závislá imaginární část komplexní permitivity. [2]

Reálná část komplexní permitivity je vlastní relativní permitivita dielektrika (míra kapacitního charakteru dielektrika). Platí, že čím vyšší je  $\varepsilon'(\omega)$ , tak tím větší je také kapacita dielektrika. Ve střídavých elektrických polích má  $\varepsilon'(\omega)$  stejný význam jako  $\varepsilon_r$  ve stejnosměrných polích a  $\varepsilon_s$  v elektrostatických polích.  $\varepsilon'(\omega)$  může být značena jako  $\varepsilon_r$ , ale musí být jasně uvedeno, že se jedná o střídavé pole. Imaginární část komplexní permitivity je ztrátové číslo a vystihuje míru ztrát v dielektriku, které je namáhané střídavým elektrickým polem. V grafech se často píše  $\varepsilon'(\omega)$  a  $\varepsilon''(\omega)$  bez  $(\omega)$ . Když se dosadí rovnice (1.3.17) do rovnice (1.3.16), platí vztah:

$$\vec{D}m \cdot e^{-j\delta} = [\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega)] \cdot \vec{E}m \quad (1.3.18)$$

Grafická interpretace vztahu (1.3.18) na zobrazena na obr. 1.3.8. [2]



Obr. 1.3.8 Grafická interpretace komplexní relativní permitivity

Z grafické interpretace komplexní relativní permitivity se počítá ztrátový činitel  $tg \delta$ , který vyjadřuje vztah reálné a imaginární části komplexní relativní permitivity, podle vztahu:

$$tg \delta = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega) \cdot \vec{E}m}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega) \cdot \vec{E}m} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (1.3.19)$$

Pokud se zanedbá vliv vodivosti dielektrika, tak pro jednotlivé složky komplexní relativní permitivity platí tyto vztahy:

$$\begin{aligned} \varepsilon'(\omega \rightarrow 0) &= \varepsilon_s \\ \varepsilon'(\omega \rightarrow \infty) &= \varepsilon_\infty \\ \varepsilon''(\omega \rightarrow 0) &= 0 \\ \varepsilon''(\omega \rightarrow \infty) &= 0 \end{aligned} \quad (1.3.20)$$

$\varepsilon_\infty$  je teoretická hodnota relativní permitivity, která platí pro frekvenci rovné nekonečnu a  $\varepsilon_s$  představuje statickou relativní permitivitu, která platí pro nulovou frekvenci. [2]

U polárních dielektrik se stává, že dipóly nemohou sledovat rychlé změny elektrického pole okamžitě. Dipóly sledují tyto rychlé změny elektrického pole s jistým zpožděním (vznik dielektrických ztrát). Toto zpoždění se nazývá dielektrická relaxace a trvá určitou relaxační dobu. U nepolárních dielektrik není reálná část permitivity frekvenčně závislá a imaginární část se u těchto dielektrik neprojeví. [2]

### Debyeovy rovnice

Existuje rovnice komplexní permitivity, která platí pro slabě polární kapalná dielektrika. Pan Debye tuto rovnici objevil a je podle něho pojmenována. Platí vztah:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (1.3.21)$$

$\tau$  značí relaxační dobu, která je závislá na teplotě.



Debyeova rovnice platí jen pro jednu relaxační dobu a pro jeden mechanismus polarizace. Rovnice (1.3.21) se může rozdělit na reálnou a imaginární část, když se vynásobí zlomkem  $\left(\frac{1-j\omega\tau}{1-j\omega\tau}\right)$ :

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} - j \cdot \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (1.3.22)$$

Rovnici (1.3.22) je nutné rozložit na reálnou a imaginární část:

$$\begin{aligned} \varepsilon'(\omega) &= \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \\ \varepsilon''(\omega) &= \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \end{aligned} \quad (1.3.23)$$

Jak již bylo zmíněno, ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  je poměr imaginární a reálné části komplexní permitivity. Z výše uvedených rovnic (1.3.23) vyplývá, že ztrátový činitel se vypočítá ze vztahu:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}}{\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}} \quad (1.3.24)$$

Po několika jednoduchých matematických úpravách vyjde vztah:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \cdot \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (1.3.25)$$

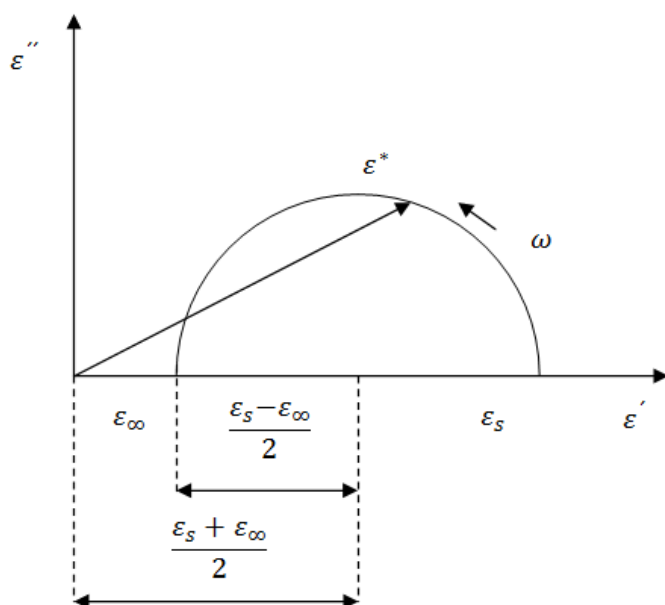
Debyeovy rovnice popisuje chování dielektrika pouze pro jeden mechanismus polarizace a platí, že dipóly se vzájemně neovlivňují a všechny dipóly mají také stejnou relaxační dobu. [2]

## Cole-Cole rovnice

Bratři Coleovi ověřili, že Debyeovy rovnice skutečně platí. Toto ověření provedli eliminací členů  $\tau$  a  $\omega$  v rovnicích (1.3.23). Touto eliminací získali takzvanou Cole-Cole rovnici:

$$\left(\varepsilon'(\omega) - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 + (\varepsilon''(\omega))^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (1.3.26)$$

Rovnice (1.3.26) vyjadřuje závislost imaginární části komplexní relativní permitivity na reálné  $[\varepsilon' = f(\varepsilon'')]$ . Grafické znázornění Cole-Cole rovnice se nazývá Cole-Cole kruhový diagram (*obr. 1.3.9*). Tento diagram má ideální tvar, protože byl sestrojen na základě předpokladů jednoho polarizačního mechanismu s jednou dobou relaxace. Ideální tvar Cole-Cole diagramu tedy platí pouze pro ideální dielektrikum. U reálných dielektrik se průběh tohoto diagramu velice liší od jeho ideální podoby. Je to způsobeno tím, že reálná dielektrika se skládají z několika rozdílných skupin polárních molekul, které mají jiné doby relaxace. Celkový průběh diagramu je tedy dán složením neboli superpozicí jednotlivých dílčích Debyeových mechanismů, které mají různé doby relaxace. [2]



Obr. 1.3.9 Ideální tvar Cole-Cole diagramu

### **1.3.2 Polarizace bez působení vnějšího elektrického pole**

K polarizaci dielektrika dochází i bez působení elektrického pole. Známe dva druhy těchto polarizací a to piezoelektrickou polarizaci a spontánní polarizaci. [2]

#### **1.3.2.1 Piezoelektrická polarizace**

Piezoelektrická polarizace se vyskytuje v piezoelektrikách, což jsou látky, které jsou schopny se polarizovat působením mechanického namáhání. V případě stlačení krystalu piezoelektrika se na jeho povrchu objeví vázaný náboj, respektive dojde k jeho polarizaci. Tato schopnost polarizace velice souvisí se strukturou látky. Nutnou podmínkou pro vznik piezoelektrického jevu je, že neexistuje žádný střed symetrie struktury dané látky. Naopak v případě připojení vnějšího elektrického pole k piezoelektriku dojde k výrazné mechanické deformaci (změně rozměrů) této látky. Tomuto jevu se říká reciproční (opačný) piezoelektrický jev. Na připojení do vnějšího elektrického pole reagují změnou rozměrů i izotropní dielektrika (ve všech směrech mají stejné fyzikální vlastnosti) a krystaly se středem v souměrnosti. Tento jev se jmenuje elektrostriční jev. Největší rozdíl mezi recipročním (opačným) piezoelektrickým jevem a elektrostričním jevem je tom, že změny rozměrů u elektrostričního jevu jsou o několik řádů menší oproti recipročnímu (opačnému) jevu. [2]

#### **1.3.2.2 Spontánní polarizace**

Spontánní polarizace se vyskytuje u elektretů a v pyroelektrikách. Elektrety nemají symetrickou strukturu, a proto lze u nich pozorovat také piezoelektrický jev. Elektrety se dělí na fotoelektrety a elektroelektrety. U fotoelektretů se spontánní polarizace dosáhne vhodným tepelným zpracováním a působením vlivu světla. U elektroelektretů se spontánní polarizace dosáhne vhodným tepelným zpracováním a působením vnějšího elektrického pole. Rozhodující je skutečnost, že elektrety si stav zpolarizování udrží relativně dlouho i po skončení působení výše jmenovaných činitelů. [2, 4]

V pyroelektrikách je spontánní polarizace způsobena jejich zvláštní strukturou. Rozlišují se pyroelektrika lineární a pyroelektrika nelineární (feroelektrika). U lineárních pyroelektrik je možno polarizace ovlivňovat jenom pomocí teploty a tyto pyroelektrika nemají doménovou strukturu. U nelineárních pyroelektrik lze polarizaci ovlivňovat působením teploty a i pomocí vnějšího elektrického pole. Nelineární pyroelektrika (feroelektrika) mají doménovou strukturu, z nichž každá je polarizována spontánně. Z makroskopického

(fenomenologického) hlediska se však tyto polarizace jednotlivých struktur neprojeví, protože směry vektorů polarizace jsou v doménách zcela neuspořádané. Jestliže však začne působit vnější elektrické pole, tyto domény se přeorientují ve směru působícího elektrického pole a pomocí tohoto pole je tedy možno velikost polarizace měnit. Je třeba si uvědomit, že podstatou feroelektrických vlastností feroelektrik je spontánní polarizace a vnější elektrické pole tedy není bezprostřední příčinou vzniku polarizace, pouze orientuje vektory polarizace, které se tam nacházely již před jeho působením. [2]

## 1.4 Elektrická vodivost dielektrik

Ideální dielektrikum neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje a neobsahuje žádné nežádoucí příměsi a znečištění, proto má nulovou vodivost. Reálně používaná dielektrika však mají nenulovou elektrickou vodivost a je s ní třeba počítat. Vodivost dielektrika se projevuje ve stejnosměrném i střídavém poli. Vzhledem k zaměření této práce je pozornost soustředěna na pevná dielektrika. [2, 3]

### 1.4.1 Hodnocení dielektrik

Pro hodnocení dielektrik z hlediska jejich vodivosti se používá měření měrného elektrického odporu nebo je možné udělat hodnocení dielektrika podle jeho typu volných nosičů elektrického náboje. [2, 3]

#### 1.4.1.1 Hodnocení z hlediska měrného elektrického odporu

Měrný elektrický odpor a měrná elektrická vodivost jsou vhodné veličiny na porovnání dielektrik mezi sebou. Měrný vnitřní elektrický odpor neboli vnitřní rezistivita se značí  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]. Měrný vnitřní elektrický odpor je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř dielektrika. Měrná vnitřní elektrická vodivost neboli konduktivita se značí  $\gamma$  [ $S \cdot m^{-1}$ ]. [2, 3]

Vzájemný vztah těchto veličin je:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \tag{1.4.1}$$

Pro velikost měrného vnitřního elektrického odporu v homogenním poli pro plochý vzorek platí vztah:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad (1.4.2)$$

$R [\Omega]$  je hodnota izolačního odporu,  $h [m]$  je tloušťka vzorku a  $S [m^2]$  je plocha elektrod.

Takzvaný izolační odpor se vypočte jako:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1.4.3)$$

$U [V]$  je připojené stejnosměrné napětí na elektrody, které se dotýkají měřeného dielektrika a  $I [A]$  je celkový stejnosměrný proud procházející dielektrikem mezi těmito elektrodami. [2, 3]

Pro získání velikosti měrného vnitřního elektrického odporu se musí provést přepočítání izolačního odporu na uvažovaný rozměr zkoušeného vzorku (1.4.2). Měrný vnitřní elektrický odpor je tedy redukován na jistou objemovou jednotku. Pomocí izolačního odporu nelze mezi sebou dielektrika porovnávat, pokud nejsou k dispozici naprosto totožné zkušební vzorky. Porovnávání dielektrik je možné provést pomocí měrného vnitřního elektrického odporu. [2, 3]

#### **1.4.1.2 Hodnocení z hlediska typů volných nosičů elektrického náboje**

V případě daného hodnocení se určuje typ elektrické vodivosti na základě toho, který z volných nosičů se podílí na vedení. Rozlišuje se elektrická vodivost elektronová, iontová, děrová, protonová a elektroforetická. Základní vodivost je iontová a elektronová. V případě elektronové, děrové a protonové vodivosti je elektrický náboj přenášen pomocí elementárních částic. Pokud se jedná o iontovou vodivost, je náboj přenášen pomocí iontů a jestliže se jedná o elektroforetickou vodivost, je náboj přenášen většími skupinami částic. Ve slabých elektrických polích jsou nejběžnějšími volnými nosiči elektrického náboje ionty vzniklé disociací vlastní látky nebo ionty vzniklé disociací příměsí a nečistot. V silnějších elektrických polích může docházet ke vstřikování nosičů náboje do dielektrika z přiložených elektrod (např. volné elektrony). [2, 3]

Pohyb a vznik volných nosičů elektrického náboje velmi záleží na skupenství. V různých skupenstvích jsou totiž různé vzdálenosti částic (různá vnitřní viskozita mezi nimi). Z tohoto plyne, že je různá možnost vzájemného ovlivňování částic. Skupenství se rozděluje na plynné, kapalně a pevné. Tato práce je spíše zaměřena na pevná dielektrika a plynná a kapalná dielektrika jsou popsána jen okrajově. [2, 3]

#### **1.4.2 Elektrická vodivost plynných dielektrik**

Plynná dielektrika mají elektronovou i iontovou vodivost. Plyny obsahují převážně neutrální molekuly, přičemž vzdálenost mezi nimi je řádově stokrát větší, než jejich vlastní rozměry. Aby vůbec mohlo dojít k průchodu proudu, musí nejdříve dojít ke vzniku volných nosičů elektrického náboje. Tento proces se nazývá ionizace plynu. K ionizaci atomu plynu dojde tehdy, když pohltí dostatečně velké množství ionizační energie (narázová ionizace-vliv působení elektrického pole nebo vysoké teploty, fotoionizace-vliv rentgenového a kosmického záření, povrchová ionizace-vliv elektronů uvolněných z povrchu elektrod v důsledku silnějšího elektrického pole). Vlivem těchto činitelů dochází k porušení rovnováhy neutrálního atomu, protože se uvolní jeden nebo více elektronů, a tak dojde ke vzniku volných nosičů elektrického náboje. Z původně neutrálního atomu se stane kladný iont. Volné elektrony se mohou také zachytávat na původně neutrálních atomech a vytváří tak záporné ionty. [2, 3]

Vlivem přiloženého elektrického pole se mohou nabitě částice (elektrony, ionty) pohybovat v plynu skoro volně, protože vzájemné působení mezi jednotlivými molekulami je v plynu velmi malé. Současně s procesem ionizace, probíhá v plynu i rekombinace. Rekombinace je děj, při kterém dochází ke střetu částic opačného znaménka a vznikne z toho neutrální atom nebo molekula. [2, 3]

Plyny jsou obecně výbornými dielektriky ve slabých elektrických polích a v nízkých teplotách, protože obsahují málo volných nosičů elektrického náboje. [2]

#### **1.4.3 Elektrická vodivost kapalných dielektrik**

Kapalná dielektrika mají elektronovou i iontovou vodivost. Kapalná dielektrika se samozřejmě liší od plynných dielektrik, a vznikají tavením pevné látky nebo kondenzací plynů. Vzájemné ovlivňování jednotlivých molekul je u kapalných dielektrik větší, protože se jedná o těsnější uspořádání a tedy síly, které působí mezi molekulami, jsou tak vyšší. Toto

těsnější uspořádání, oproti plynným dielektrickým látkám, značně omezí pohyb těchto molekul a tyto molekuly mohou vytvořit pevnější a neustále se měnící celky (klastry). Klastry a jednotlivé částice se mohou vzájemně posunovat a to umožňuje kapalných dielektrikům zaujmout tvar podle tvaru nádoby, v které jsou umístěny. [2, 3]

Vodivost kapalných dielektrik závisí na složení daného dielektrika a na obsahu příměsí, nečistot a vody. Pro účely studia vodivosti se dielektrika rozdělují na extrémně čistá a technicky čistá. Extrémně čistá kapalná dielektrika mají velice nízkou měrnou elektrickou vodivost (konduktivitu), která se pohybuje v rozmezí  $\gamma = 10^{-14} - 10^{-15} [S \cdot m^{-1}]$ . Tato vodivost je způsobena volnými nosiči elektrického náboje, které vznikají různými způsoby. Volné nosiče náboje mohou vznikat ionizací neutrálních molekul vlivem ionizačního činitele neboli záření (vzniknou volné elektrony), disociací molekul vlastního dielektrika (vzniknou volné ionty) nebo disociací případných příměsí v dielektriku (také vzniknou volné ionty). Jak již bylo uvedeno, v silnějších elektrických polích může docházet ke vstříkování nosičů náboje do dielektrika z přiložených elektrod (např. volné elektrony). V případě technicky čistých kapalných dielektrik se konduktivita pohybuje v rozmezí  $\gamma = 10^{-11} - 10^{-12} [S \cdot m^{-1}]$ . Tato zvýšená konduktivita je způsobena zvýšenou koncentrací volných nosičů elektrického náboje v dielektriku. U technicky čistých kapalných dielektrik se rozlišuje iontová (vlastní, nevlastní) a elektroforetická vodivost. [2, 3]

Konduktivita kapalných dielektrik je silně závislá na teplotě a na struktuře dielektrika. V praxi lze použít jako dielektrikum pouze kapaliny, které mají molekulární kovalentní vazby, nemají příliš velký dipólový moment a hodnotu permitivity mají řádově do deseti z důvodů omezení dielektrických ztrát. [2]

#### **1.4.4 Elektrická vodivost pevných dielektrik**

Problematika elektrické vodivosti u pevných dielektrik je velmi složitou záležitostí, protože pevná dielektrika mají velmi rozmanitou a složitou strukturu. Pevná dielektrika mají elektronovou i iontovou vodivost, přičemž jedna z těchto vodivostí vždy převládá. U běžně používaných pevných dielektrik je v normálních podmínkách častější iontová vodivost. Elektronová vodivost se projeví v silných elektrických polích při hodnotách intenzity elektrického pole v rozmezí  $E = 10^1 - 10^2 [kV \cdot mm^{-1}]$ . Za normálních podmínek se však velikost této intenzity téměř nevyskytuje. [2, 3]

Vysvětlení problematiky vodivosti pevných dielektrik je mnohem složitější než u plynných nebo kapalných dielektrik. Pro pohyblivost iontu, který vznikl například disociací neutrální molekuly nečistot, lze použít zjednodušený vztah, který je odvozen na základě modelu dvojité potenciálové jámy:

$$b = \frac{f_0 \cdot q \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (1.4.4)$$

$b [m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$  je pohyblivost iontu,  $f_0 [Hz]$  je frekvence vlastních tepelných kmitů iontu okolo rovnovážných poloh,  $q [C]$  je náboj iontu,  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1,381 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ ),  $l [m]$  značí vzdálenost rovnovážných poloh,  $T [K]$  je termodynamická teplota a  $W [kJ \cdot mol^{-1}]$  je výška potenciálové bariéry, která od sebe odděluje obě rovnovážné polohy. Tato pohyblivost iontu je dosazena do rovnice, která obecně platí pro konduktivitu:

$$\gamma = n \cdot q \cdot b \quad (1.4.5)$$

$n [m^{-3}]$  je koncentrace iontů a  $\gamma [S \cdot m^{-1}]$  je konduktivita. [2]

Pevná dielektrika mají výborné vlastnosti ve slabých elektrických polích a v poměrně nízkých teplotách. Pro další možné úvahy o elektrické vodivosti pevných dielektrik se pevná dielektrika rozdělují do tří skupin. Jedná se o iontová krystalická dielektrika, anorganická amorfnní dielektrika a organická amorfnní dielektrika. V této práci však tyto úvahy nejsou řešeny. [2]

#### 1.4.4.1 Povrchová vodivost pevných dielektrik

U pevných dielektrik se kromě měrné vnitřní elektrické vodivosti uplatňuje i měrná povrchová elektrická vodivost. Měrná povrchová elektrická vodivost neboli povrchová konduktivita  $\gamma_P [S]$  je definována vztahem:

$$\gamma_P = \frac{I_P}{E} \quad (1.4.6)$$

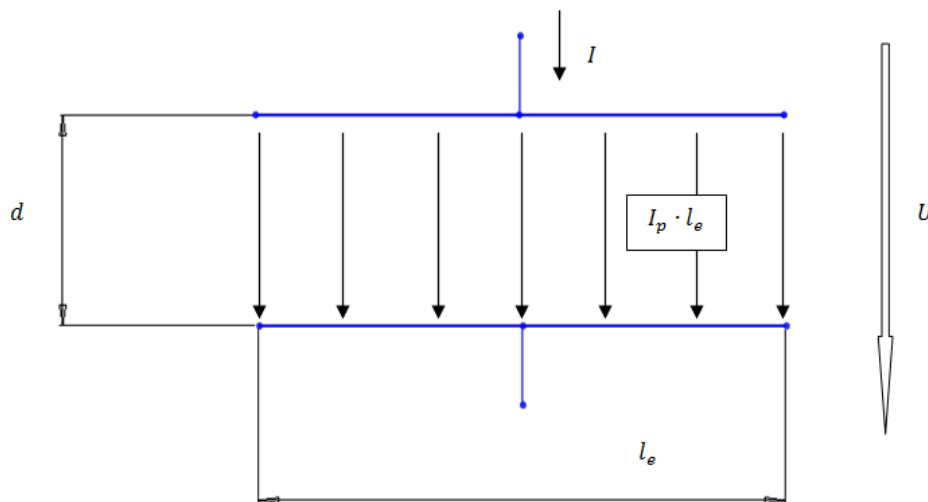


$E [V \cdot m^{-1}]$  je intenzita stejnosměrného elektrického pole ( $E = \frac{U}{d}$ ) a  $I_p [A]$  je proud tekoucí po povrchu dielektrika, připadající na jednotku délky elektrody. [2, 3]

Na obr. 1.4.1 je model pevného dielektrika, který je protékán povrchovým proudem. Pomocí tohoto modelu lze upravit rovnici (1.4.6) na rovnici (1.4.7):

$$\gamma_P = \frac{I}{l_e} \cdot \frac{d}{U} = \frac{I}{U} \cdot \frac{d}{l_e} \quad (1.4.7)$$

$I [A]$  je celkový proud, který protéká po povrchu dielektrika ( $I = I_p \cdot l_e$ ),  $U [V]$  je stejnosměrné napětí přiložené na elektrodách,  $l_e [m]$  je délka elektrod na povrchu dielektrika a  $d [m]$  je vzdálenost elektrod. [2]



Obr.1.4.1 Model pevného dielektrika zobrazující povrchový proud

Z rovnice (1.4.7) vyplývá, že měrnou povrchovou elektrickou vodivost lze hodnotit na základě měrného povrchového elektrického odporu. Měrný povrchový elektrický odpor neboli povrchová rezistivita se značí  $\rho_P [\Omega]$  a je redukován na jistou jednotku plochy. Vypočítá se ze vztahu:

$$\rho_P = R_P \cdot \frac{l_e}{d} \quad (1.4.8)$$

$R_p$  [ $\Omega$ ] je povrchový elektrický odpor dielektrika, který je naměřený mezi rovnoběžnými elektrodami. [2, 3]

Měrná povrchová elektrická vodivost je způsobena volnými nosiči elektrického náboje, které se pohybují po povrchu dielektrika. Tyto volné nosiče vznikají hlavně disociací molekul nečistot, které se vyskytují na povrchu dielektrika. Dále platí, že čím větší je vlhkost povrchu dielektrika, tím větší je jeho povrchová konduktivita. Malý měrný povrchový elektrický odpor znamená, že klouzavé výboje budou snadno klouzat po povrchu dielektrika. Tento jev se nejvíce projevuje u skel, protože jejich povrchová konduktivita je u nich větší než vnitřní konduktivita. Při výbojích vzniká ozón ( $O_3$ ), který je ve větším množství jedovatý. [2, 3]

## 1.5 Dielektrické ztráty

Velikost dielektrických ztrát a s nimi souvisejícího ztrátového činitele (pro střídavé pole) jsou velmi důležité vlastnosti pro určení chování dielektrika v elektrickém poli. Pro dielektrické ztráty obecně platí, že vznikají ve stejnosměrných i střídavých elektrických polích a při libovolném tvaru průběhu napětí. Tyto ztráty způsobují při střídavých polích změnu fázového úhlu ( $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ) mezi napětím a proudem kondenzátoru. Dielektrické ztráty jsou tepelného charakteru. V některých oblastech je dielektrický ohřev řízen a využíván, ale pro oblast elektroizolační techniky je nežádoucí. Ohřev je totiž příčinou degradace dielektrik a při provozu elektrického zařízení je potřeba zajistit odvod tepla tak, aby nedošlo k lokálnímu přehřátí dielektrika. [2, 3]

### 1.5.1 Druhy dielektrických ztrát

Dielektrické ztráty závisí na mnoho okolnostech. Mezi tyto okolnosti patří chemické složení, vnitřní struktura, skupenství, obsah příměsí či obsah nečistot dielektrika a samozřejmě závisí i na vnějších fyzikálních podmínkách okolí. [2, 3]

#### 1.5.1.1 Polarizační ztráty

Během deformačních polarizací nedochází ke ztrátám energie. Během relaxačních polarizací však dochází ke ztrátám energie střídavého elektrického pole, protože aby toto pole natočilo podle svého směru slabě vázané nosiče (molekuly), musí překonávat a usměrňovat jejich chaotický tepelný pohyb. To je příčinou opoždění pohybu slabě vázaných nosičů za

změnami přiloženého střídavého elektrického pole. Část energie, která je získaná na úkor střídavého elektrického pole, se mění v teplo a ohřívá dielektrikum. Takzvané relaxační ztráty závisí na teplotě, protože na teplotě záleží velikost tepelného pohybu slabě vázaných nosičů a na frekvenci přiloženého střídavého elektrického pole. [2, 3]

Na dielektrických ztrátách se podílí i migrační polarizace, která je způsobena pohybem volných nosičů elektrického náboje (např. elektrony). Při této polarizaci vzniká takzvaný prostorový náboj, který mění svoje rozmístění s měnícím se střídavým elektrickým polem. Ztrátové je rovněž pouhé přemístování volných nosičů náboje dielektrikem. Migrační ztráty jsou silně závislé na teplotě a frekvenci, protože pohyblivost volných nosičů elektrického náboje s těmito veličinami velice úzce souvisí. [2, 3]

#### **1.5.1.2 Vodivostní ztráty**

Tyto ztráty jsou způsobeny vlivem proudu, který teče vnitřkem plynného, kapalného nebo pevného dielektrika a také vlivem proudu, který teče po jeho povrchu (pouze u pevných dielektrik). Tyto proudy se vyskytují ve všech dielektrických materiálech a o jejich uplatnění z hlediska dielektrických ztrát rozhoduje velikost konduktivity daného dielektrika. Čím je vyšší konduktivita dielektrika, tím jsou také vyšší vodivostní ztráty. Průchodem vodivostního proudu se dielektrikum zahřívá (Joulovy ztráty). [2, 3]

#### **1.5.1.3 Ionizační ztráty**

Dielektrické ztráty mohou vznikat i v důsledku výbojové činnosti. Výbojová činnost vzniká například v dutinkách nehomogenního dielektrika. Jedná se o takzvané částečné výboje, které dielektrikum zahřívají. Tyto výboje mají degradační účinky na prostředí, kde vznikají a způsobí v dielektriku jisté chemické a fyzikální změny v bezprostřední blízkosti dutinek. Změny jsou nevratné a zhoršují dielektrické vlastnosti. Výbojová činnost v dutinkách může probíhat třeba až od určité velikosti přiloženého napětí. Při velmi intenzivní výbojové činnosti je oteplení způsobené touto výbojovou činností srovnatelné s oteplením způsobeným dielektrickými ztrátami a může tak snížit napětí tepelného průrazu. [2, 3]

## 1.5.2 Dielektrické ztráty podle druhu působícího elektrického pole

### 1.5.2.1 Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli

Jestliže je dielektrikum umístěno do stejnosměrného pole, je rozhodující pro velikost ztrát vodivostní proud. Velikost ztrát je tedy úměrná velikosti procházejícího vodivostního proudu. Tyto ztráty se nazývají Joulovy a závisí na izolačním odporu daného dielektrika. Pro výpočet ztraceného výkonu platí vztah:

$$P_Z = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} \quad (1.5.1)$$

$R_i$  [ $\Omega$ ] je izolační odpor dielektrika,  $U$  [V] je přiložené stejnosměrné napětí a  $I$  [A] je ustálený vodivostní proud, který prochází dielektrikem. [2]

Při namáhání dielektrika stejnosměrným elektrickým polem se mohou uplatnit i ionizační ztráty, které jsou však zanedbatelné oproti ztrátám vodivostním. [2]

### 1.5.2.2 Dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli

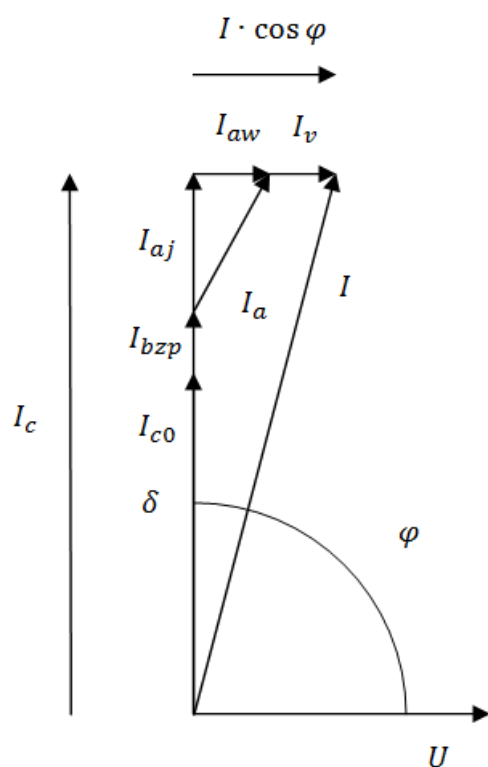
U střídavých polí jsou dielektrické ztráty dány součtem ztrát polarizačních, vodivostních i ionizačních. Obecně platí, že tyto ztráty jsou mnohem větší než ztráty způsobené stejnosměrným polem. Pro vyjádření těchto ztrát se předpokládá, že střídavé napětí i proud mají dokonalý sinusový průběh a zkoumané dielektrikum je homogenní. Relativní permitivita dielektrika, je pak v celém dielektriku stejná a děje, které v dielektriku vzniknou, je možné pokládat za lineární a mají stejný kmitočet jako přiložené napětí. [2, 3]

#### Ztrátový činitel

Při řešení dielektrických ztrát ve střídavém poli se řeší hlavně velikost ztrátového úhlu  $\delta$  [°], protože ve střídavém elektrickém poli se o tento úhel také zpožďuje časový průběh elektrické indukce za časovým průběhem elektrické intenzity. Velikost ztrátového úhlu se určuje pomocí fázorového diagramu na *obr. 1.5.1*. Z tohoto diagramu vyplývá, že díky dielektrickým ztrátám předbíhá vektor proudu vektor napětí o úhel  $\varphi$  [°], který není  $\frac{\pi}{2}$ :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta \quad (1.5.2)$$

$\delta$  vyjadřuje míru ztracené energie, která se v dielektriku změní v teplo a  $\frac{\pi}{2}$  je úhel ideálního posunu mezi proudem a napětím kondenzátoru. [2, 3]



Obr. 1.5.1 Fázorový diagram reálného dielektrika

Proud  $I_c$  je kapacitní proud dielektrika. Proud  $I_{c0}$  nabíjí geometrickou kapacitu daného dielektrika ( $C_0$ ). Velikost  $C_0$  se obvykle neměří, ale počítá a odpovídá kapacitě geometricky shodného elektrodového systému, v němž je umístěno vakuum místo původního dielektrika ( $C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l}$ ). Ve vakuu nemůže docházet k polarizaci a k dielektrickým ztrátám. Proud  $I_{bzp}$  odpovídá bezztrátové elektronové a iontové polarizaci. Proud  $I_a$  (absorpční proud) odpovídá ztrátovým polarizacím. Tento absorpční proud má ztrátovou složku  $I_{aw}$  a bezztrátovou složku  $I_{aj}$ . Bezztrátová složka absorpčního proudu odpovídá kapacitě  $C_p$ , o kterou se zvětšila geometrická kapacita daného dielektrika  $C_0$  vlivem absorpčních jevů. Ztrátová složka absorpčního proudu odpovídá ztrátám energie v daném dielektriku. Vodivostní proud  $I_v$  je způsobený určitou elektrickou vodivostí reálného dielektrika a je ve fázi s napětím  $U$ . [2, 34]

V technické praxi se tepelné ztráty v dielektriku nejčastěji vyjadřují jako tangenta ztrátového úhlu  $\operatorname{tg} \delta$  [–]. Jedná se o takzvaný ztrátový činitel. Ztráty v dielektriku se rovněž vyjadřují pomocí ztrátového výkonu. [2, 3]

### Ztrátový výkon

Hodnotu výkonu, který se ztratí v dielektriku, lze vyjádřit pomocí takzvaného ztrátového výkonu  $P_Z$  [W]. Pomocí fázorového diagramu na *obr. 1.5.1* lze dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli vyjádřit vztahy:

$$P_Z = U \cdot (I_{aw} + I_v) \quad (1.5.3)$$

$$P_Z = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \sin \delta \quad (1.5.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I \cdot \cos \varphi}{I_c} \quad (1.5.5)$$

$$P_Z = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.5.6)$$

Jednoduchou úpravou ze vztahů vyjde výsledný ztrátový výkon:

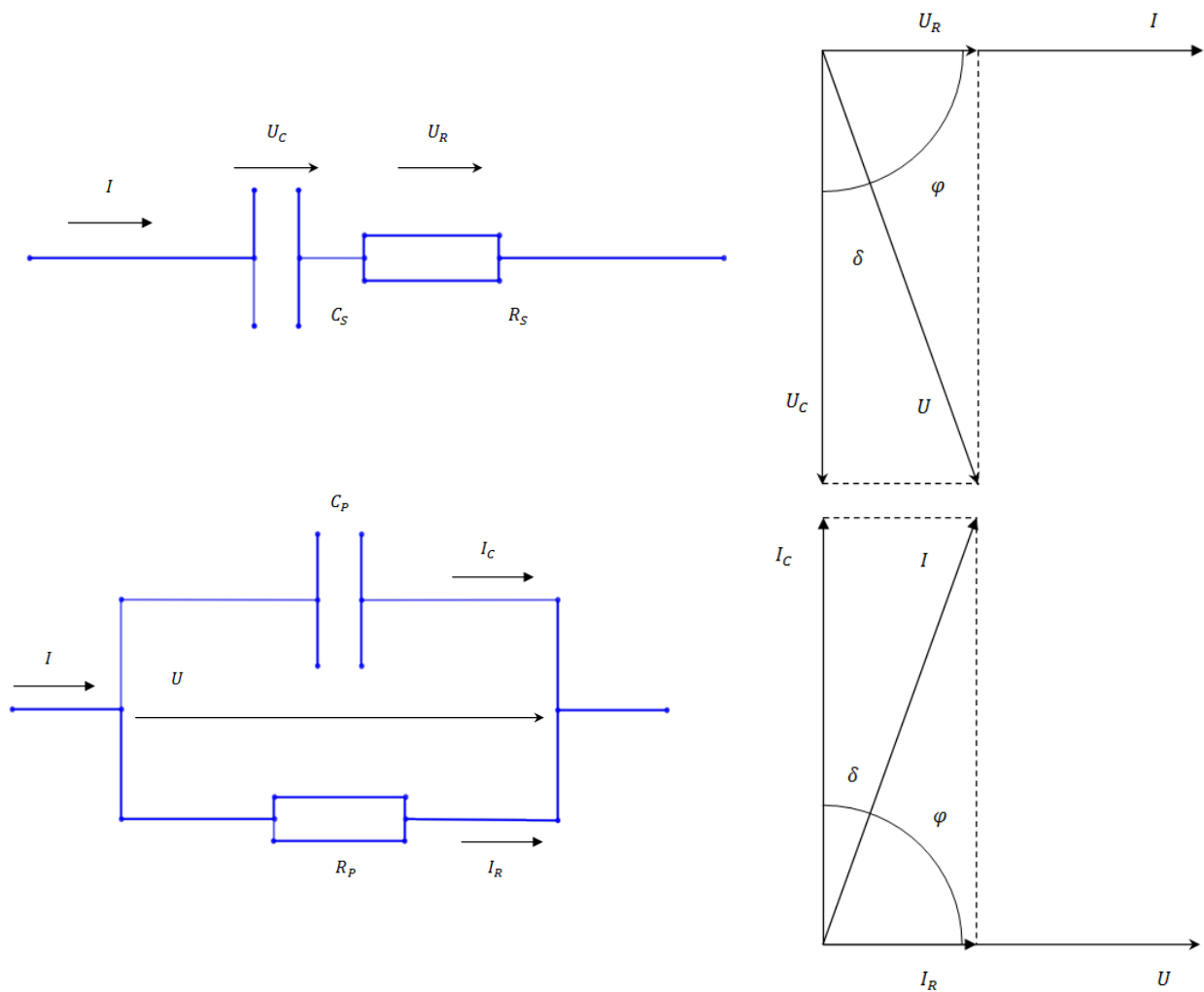
$$P_Z = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.5.7)$$

$U$  [V] je napětí přiložené na dielektrikum,  $C$  [F] je celková kapacita dielektrika, která je dána součtem geometrické kapacity  $C_o$  a kapacity  $C_p$ ,  $\omega$  je úhlová rychlost, která se vypočítá  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  [rad · s<sup>-1</sup>],  $f$  [Hz] je frekvence přiloženého střídavého napětí. [2, 3]

### Náhradní obvody dielektrika

Pro určení dielektrických ztrát pomocí ztrátového činitele a ztrátového výkonu ve střídavém poli je možno vyjít ze skutečnosti, že si lze každý kondenzátor představit jako sériové nebo paralelní zapojení ideálního odporu a ideálního kondenzátoru. Tímto způsobem vzniknou sériové a paralelní náhradní schéma dielektrika s odpovídajícími fázorovými

diagramy (obr. 1.5.2). Tyto dva obvody jsou duální a jejich rovnost spočívá v tom, že oba obvody mají při určitém kmitočtu mezi svorkami stejnou impedanci ( $Z$ ) a stejný fázový posun ( $\varphi$ ) mezi proudem a napětím. Parametry prvků náhradního obvodu musí být takové, aby fázový posuv mezi napětím a proudem byl shodný s fázovým posuvem v reálném dielektriku zkoumaného kondenzátoru. V náhradním obvodu jsou veškeré ztráty, které vzniknou v reálném kondenzátoru, vyjádřeny přiřazeným odporem. Tímto způsobem náhradní obvody simulují chování reálného kondenzátoru vzhledem k vnějším obvodům. V žádném případě však nevysvětlují fyzikální podstatu dielektrických ztrát. [2, 3, 24]



Obr. 1.5.2 Paralelní a sériové náhradní schéma dielektrika a příslušné fázorové diagramy

Pro sériové náhradní zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R_S \cdot C_S \quad (1.5.8)$$

$$P_Z = U^2 \cdot \omega \cdot C_S \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (1.5.9)$$

Pro paralelní náhradní zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot R_P \cdot C_P} \quad (1.5.10)$$

$$P_Z = U^2 \cdot \omega \cdot C_P \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.5.11)$$

$C_P$  [F] je paralelní kapacita,  $C_S$  [F] je sériová kapacita,  $R_P$  [ $\Omega$ ] je paralelní odpor a  $R_S$  [ $\Omega$ ] je sériový odpor.

## **Shrnutí dielektrických ztrát ve střídavém elektrickém poli**

Dielektrické ztráty jsou ve střídavém poli závislé na frekvenci, teplotě a intenzitě elektrického pole. Pro měření ztrátového činitele se v oblasti průmyslových frekvencí (Evropa 50 Hz, USA 60 Hz) používají můstkové metody (např. Scheringův můstek) a pro oblasti vysokých frekvencí ( $10^5$ - $10^8$  Hz) se používají metody rezonanční (např. Q-metr). Měření ztrátového činitele se provádí v závislosti na teplotě, napětí nebo frekvenci. Problematika dielektrických ztrát je velice důležitou problematikou a ovlivňuje volbu druhu dielektrika pro konkrétní účely. [2, 3]

### **1.5.3 Dielektrické ztráty podle skupenství**

#### **1.5.3.1 Dielektrické ztráty plynných dielektrik**

Plyny jsou obecně výborná dielektrika obzvláště při působení malých napětí. Celkové dielektrické ztráty jsou v plynu velice malé, pokud nedochází k ionizaci daného plynu, při které ztráty rostou. Jisté ztráty jsou způsobeny vodivostními ztrátami, které jsou nepatrné a



polarizačními ztrátami, které jsou také nepatrné a to i v případě polárních plynů. Ztrátový činitel u plynu je řádově  $10^{-8}$  při frekvenci 50 Hz. [2]

### **1.5.3.2 Dielektrické ztráty kapalných dielektrik**

Dielektrické ztráty v kapalných dielektrických materiálech závisí na tom, zda se jedná o polární nebo nepolární dielektrikum. Rovněž také záleží na obsahu a druhu příměsí a nečistot a také na vnějších podmínkách (teplota, frekvence a intenzita přiloženého elektrického pole). [2]

U nepolárních kapalných dielektrik se vyskytuje pouze elektronová polarizace, která je u běžných frekvencí, například 50 Hz, naprosto bezeztrátová. Dielektrické ztráty jsou u těchto dielektrik velice malé, protože je elektrická vodivost čistých nepolárních kapalných dielektrik nepatrná a polarizační ztráty nulové. Dielektrika tedy musí být dostatečně čistá. [2]

U polárních kapalných dielektrik se vyskytují vodivostní i polarizační ztráty. Dielektrické ztráty jsou zde pochopitelně podstatně větší než v případě nepolárních kapalných dielektrik. Zvětšení dielektrických ztrát je způsobeno nejen přispěním polarizačních ztrát, ale i větším působením ztrát vodivostních. Polární kapalná dielektrika obecně dosahují velké relativní permitivity. [2]

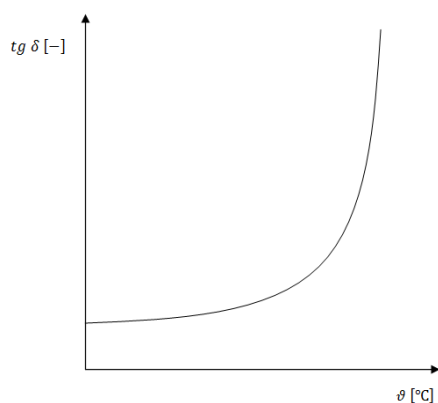
### **1.5.3.3 Dielektrické ztráty pevných dielektrik**

Pro popis dielektrických ztrát pevných dielektrik se předpokládá homogenní dielektrikum. Reálně používaná dielektrika jsou však většinou určitým způsobem nehomogenní. Tyto nehomogenity mohou vznikat během výroby, zpracování a samozřejmě i vlivem provozního namáhání. Je tedy potřeba dodržovat správný a pečlivý technologický postup výroby. Dále se používají takzvané kompozitní a vrstvené materiály, které jsou nehomogenní již sami od sebe. Nehomogenity v dielektriku velmi často přispívají k zvětšení dielektrických ztrát, protože se na nich mohou vytvářet prostorové náboje nebo v případě bublinky se může vytvořit částečný výboj, což se projeví jako ionizační ztráty. U pevných dielektrik se vyskytují vodivostní, polarizační i ionizační ztráty. [2]

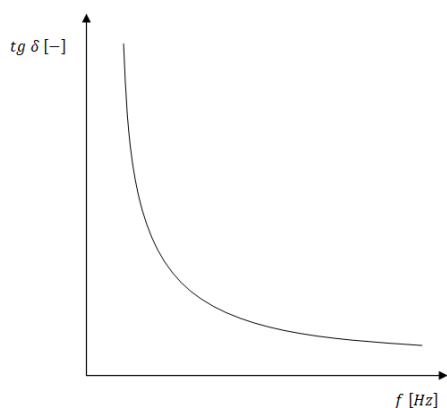
### **Nepolární (neutrální) pevná dielektrika**

U nepolárních pevných dielektrik (některé organické polymery) se prakticky uplatňují jen vodivostní ztráty, protože se v nich vyskytují jen bezeztrátové polarizace. Dielektrické

ztráty jsou proto u těchto dielektrik velice malé a používají se ve vysokofrekvenčních obvodech. Závislost ztrátového činitele nepolárního pevného dielektrika v závislosti na teplotě je na *obr. 1.5.3*. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a frekvence byly po dobu měření konstantní. Závislost ztrátového činitele nepolárního pevného dielektrika na frekvenci je na *obr. 1.5.4*. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a teploty byly po dobu měření konstantní. [2]



*Obr. 1.5.3 Závislost ztrátového činitele nepolárního pevného dielektrika na teplotě (napětí a frekvence je konstantní)*



*Obr. 1.5.4 Závislost ztrátového činitele nepolárního pevného dielektrika na frekvenci (napětí a teplota je konstantní)*

## **Krystalická iontová dielektrika s těsným uložením iontů**

U iontových pevných dielektrik závisí dielektrické ztráty na těsnosti uložení částic, z kterých je toto dielektrikum složeno. U krystalických iontových dielektrik s těsným uložením iontů se vyskytují hlavně deformační polarizace (elektronová a iontová) a iontová relaxační polarizace se vyskytuje jen nepatrně a lze její vliv na dielektrikum zanedbat. Například se může jednat o křemen ( $\epsilon_r = 3,8$ ) nebo slídu ( $\epsilon_r = 6,9 - 11,5$ ). V případě, že na tyto dielektrika působí střídavé elektrické pole, chovají se téměř jako nepolární a dielektrické ztráty jsou velmi malé a mají vodivostní charakter. Krystalická iontová dielektrika s těsným uložením iontů mají velmi podobné vlastnosti jako nepolární pevná dielektrika. [2]

## **Krystalická iontová dielektrika s netěsným uložením iontů**

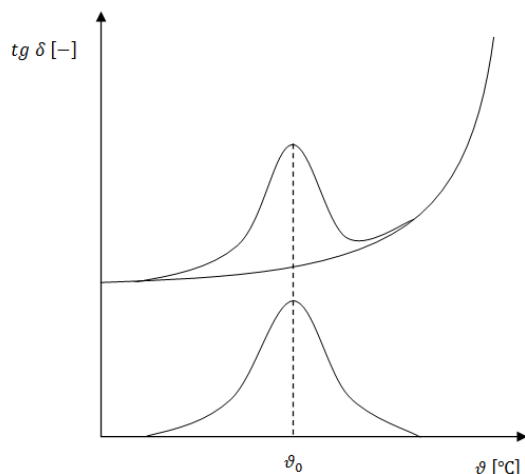
U krystalických iontových dielektrik s netěsným uložením iontů (velké množství poruch krystalové mřížky) se uplatňují mimo deformačních polarizací i iontové relaxační polarizace. Dielektrické ztráty mají v tomto případě vodivostní i polarizační charakter. [2]

## **Amorfní iontová dielektrika**

U amorfních iontových dielektrik (např. anorganická skla) se uplatňují rovněž vodivostní i polarizační ztráty (iontové relaxační polarizace). Podle chemického složení, poruch vnitřní stavby a druhu nečistot a příměsí může být i různý poměr velikostí vodivostních a polarizačních ztrát. Elektrické vlastnosti těchto dielektrik se podobají vlastnostem krystalických iontových dielektrik s netěsným uložením iontů. [2]

## **Polární (dipólová) pevná dielektrika**

U polárních pevných dielektrik se výrazně projevuje dipólová relaxační polarizace, která je ztrátová. Dielektrické ztráty tak mají vodivostní i polarizační charakter. Dokonce mohou vznikat i ionizační ztráty v dutinkách dielektrika. Příklad, jak se projevují vodivostní a polarizační ztráty spolu, je zobrazen na *obr. 1.5.5* a jedná se o závislost ztrátového činitele polárního pevného dielektrika v závislosti na teplotě. Při měření této charakteristiky pomocí střídavého napětí je potřeba, aby hodnoty napětí a frekvence byly po dobu měření konstantní. [2]



Obr. 1.5.5 Závislost ztrátového činitele polárního pevného dielektrika na teplotě (napětí a frekvence je konstantní)

## 2 Dielektrická spektroskopie

V polovině 80. let 20. století bylo vyvinuto několik produktů, které měřily elektromagnetické vlastnosti materiálů (permitivitu, permeabilitu, měrný vnitřní elektrický odpor). Tyto produkty byly vyvinuty pro lidi, kteří se zabývali vývojem elektronických součástí, obvodů a systémů. Od svého uvedení na trh našly tyto produkty mnoho uplatnění. V této práci je zaměřena pozornost pouze na produkty, které umožňují měření permitivity a dalších dielektrických vlastností. [23]

Dielektrické vlastnosti materiálu jsou určeny jeho molekulární strukturou. Jestliže dojde ke změně molekulární struktury materiálu, změní se rovněž jeho dielektrické vlastnosti. To se děje například vlivem procesů stárnutí, které jsou v této práci vyhodnocovány. Dielektrické materiály jsou charakterizovány hlavně permitivitou. Permitivita je jeden z faktorů, které určují, jak dielektrické materiály reagují na elektromagnetické pole. [23]

### 2.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice se dají vyjádřit integrálním a diferenciálním tvarem. Pro potřeby práce jsou zde uvedeny rovnice, které platí pro nestacionární elektromagnetické pole, protože se měřilo střídavým napětím. Základními zákony pro nestacionární elektromagnetické pole je úplná soustava Maxwellových rovnic (*tab. 2.1.1*) i s materiálovými vztahy (*tab. 2.1.2*). [4]

	<b>Integrální tvar</b>	<b>Diferenciální tvar</b>
<b>První Maxwellova rovnice</b>	$\oint_c H dl = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot } H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
<b>Druhá Maxwellova rovnice</b>	$\oint_c E dl = - \frac{d\phi}{dt}$	$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t}$
<b>Třetí Maxwellova rovnice</b>	$\oint_s D dS = Q$	$\text{div } D = \rho$
<b>Čtvrtá Maxwellova rovnice</b>	$\oint_s B dS = 0$	$\text{div } B = 0$

Tab. 2.1.1 Základní zákony nestacionárního elektromagnetického pole [4]

<b>Permitivita</b>	$\varepsilon = \frac{D}{E}$	$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$
<b>Permeabilita</b>	$\mu = \frac{B}{H}$	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
<b>Konduktivita</b>	$\gamma = \frac{J}{E}$	$\gamma = \frac{1}{\rho}$

Tab. 2.1.2 Materiálové vztahy, které platí pro nestacionární elektromagnetické pole [4]

$I [A]$  je elektrický proud,  $J [A \cdot m^{-2}]$  je hustota elektrického proudu,  $E [V \cdot m^{-1}]$  je intenzita elektrického pole,  $D [C \cdot m^{-2}]$  je elektrická indukce,  $B [T]$  je magnetická indukce,  $H [A \cdot m^{-1}]$  je intenzita magnetického pole,  $\psi [C]$  je elektrický indukční tok,  $\phi [Wb]$  je magnetický indukční tok,  $\varepsilon [F \cdot m^{-1}]$  je permitivita,  $\gamma [S \cdot m^{-1}]$  je konduktivita,  $\mu [H \cdot m^{-1}]$  je permeabilita,  $U_{MN} [V]$  je elektrické napětí,  $Um_{MN} [A]$  je magnetický napětí a  $\rho [\Omega \cdot m]$  je měrný elektrický odpor. Pro výpočet elektrického indukčního toku, magnetického indukčního toku, elektrického proudu, elektrického a magnetického napětí platí vztahy v tab. 2.1.3. [4]

<b>Elektrický indukční tok</b>	$\psi = \int_S D dS$
<b>Magnetický indukční tok</b>	$\phi = \int_S B dS$
<b>Elektrický proud</b>	$I = \int_S J dS$
<b>Elektrické napětí</b>	$U_{MN} = \int_M^N E dl$
<b>Magnetické napětí</b>	$Um_{MN} = \int_{M(l)}^N H dl$

Tab. 2.1.3 Výpočet elektrického indukčního toku, magnetického indukčního toku, elektrického proudu, elektrického napětí a magnetického napětí [4]

## 2.2 Elektrotechnologická diagnostika dielektrických materiálů

Po elektrickém zařízení se obecně požaduje jeho hmotnostní a rozměrová minimalizace a dále roste potřeba na maximální využití onoho zařízení (roste zatížení). Oblast dielektrických materiálů je součástí takzvaného materiálového inženýrství, které zajišťuje vhodný výběr těchto materiálů. Tento výběr je učiněn s ohledem na předpokládanou funkci dielektrického materiálu v zařízení. Podle požadavků, které jsou na dielektrický materiál kladeny, je možno na základě jejich vnitřní struktury vyhledat vhodný materiál. Udělat diagnostiku klíčových vlastností dielektrického materiálu je prioritní zájem všech, kteří se na procesu výroby elektrického zařízení podílejí. Elektrotechnologická diagnostika poskytuje informace o dielektrických materiálech na všech stupních výroby elektrických zařízení v úzké návaznosti na technologie (výrobní postupy). [2]

Elektrotechnologická diagnostika používá makroskopický a mikroskopický přístup k diagnostikovanému objektu. Při makroskopickém přístupu je zaměřena pozornost na určité reakce diagnostikovaného objektu na vstupní diagnostické signály. Mikroskopický přístup je

zaměřen na děje ve struktuře diagnostikovaného objektu. Mikroskopický přístup dává lepší informace o dielektrickém materiálu, ale je dražší a náročnější než makroskopický přístup. Také je možné provádět destruktivní nebo nedestruktivní zkoušky. Destruktivní zkouška má větší vypovídací schopnost než nedestruktivní zkouška, ale je ekonomicky náročnější a někdy neúnosně roste potřeba vzorků. [2]

## **2.3 Metoda dielektrické spektroskopie**

Dielektrická spektroskopie je nedestruktivní diagnostická metoda pro diagnostiku dielektrických materiálů. Jedná se o makroskopický přístup. Principem dielektrické spektroskopie pro střídavé pole je sledování odezvy polarizace částic na základě změny frekvence vnějšího elektrického pole. Používá se tam, kde dochází nějakým způsobem ke změnám elektrických dipólů nebo jejich vzájemné interakci uvnitř dielektrického materiálu. Tato metoda se používá například pro diagnostiku procesů stárnutí dielektrických materiálů, která je náplní předkládané práce a výsledky diagnostiky se pak využijí při návrhu dielektrických materiálů pro různé elektrotechnické aplikace. Těžištěm zájmu dielektrické spektroskopie ve střídavém elektrickém poli je získání závislosti reálné a imaginární složky komplexní permitivity dielektrického materiálu na frekvenci. Předmětem zkoumání u dielektrické spektroskopie jsou také ztráty vznikající v dielektrickém materiálu, které jsou nežádoucí. [23, 29]

## **2.4 Využití dielektrických vlastností**

Dielektrických vlastností se využívá při měření obsahu vlhkosti, protože množství vody v pevném materiálu nebo v kapalině může být stanoveno pomocí měření permitivity. Výhodou této techniky oproti tradičním metodám (sušení v peci) je, že permitivita je změřena téměř v reálném čase. Dielektrických vlastností je také možné využít k detekci rakoviny, protože rakovinné buňky mají rozdílnou permitivitu na rozdíl od zdravých buněk. Dále se využívají ke zkoumání chemických reakcí, protože když chemické látky reagují, jejich permitivita se určitým způsobem mění. Dalším možným využitím je určení mechanického napětí materiálu, výzkum struktury materiálu, obsahu bakterií atd. [23]

## 3 Experimentální část

### 3.1 Popis měření

Měření v této práci se zabývá vyhodnocováním dielektrických materiálů A, B, C a D z hlediska změny jejich dielektrických vlastností ve střídavém elektrickém poli o amplitudě pět voltů a frekvencích od 20 Hz do 2 MHz. Je zřejmé, že dielektrické vlastnosti vyjmenovaných materiálů se budou lišit, protože každý z těchto materiálů má rozdílnou vnitřní strukturu (kapitola 3.2.1). Na měření byly použity vzorky s rozdílnou tloušťkou o délce 100 mm a šířce 100 mm. Vzorky zkoumaných dielektrických materiálů byly podrobeny zrychlenému tepelnému stárnutí při různých teplotách a časech expozice (*tab. 3.1.1*). Pro každý soubor vzorků bylo provedeno měření zkoumaných veličin s četností 12. Byly měřeny tři vzorky z každého souboru a každý vzorek byl v rámci statistické významnosti měřen čtyřikrát na čtyřech různých místech, protože se jedná o nehomogenní dielektrické materiály a dielektrické vlastnosti se mohou v různých místech lišit.

Materiál	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	170	24
A	170	48
A	170	72
A	170	96
A	170	120
A	170	144
A	180	16
A	180	37
A	180	61
A	180	80
A	180	96
A	190	6
A	190	13
A	190	23
A	190	32
A	190	40
A	200	2
A	200	7
A	200	13
A	200	19
A	200	24
B	20	0
B	170	96
B	170	192
B	170	288



B	170	384
B	170	480
B	170	576
B	180	48
B	180	96
B	180	120
B	180	144
B	180	168
B	190	24
B	190	48
B	190	60
B	190	72
B	190	84
B	200	10
B	200	15
B	200	20
B	200	25
C	20	0
C	170	192
C	170	288
C	170	384
C	170	480
C	170	600
C	175	48
C	175	96
C	175	144
C	175	192
C	175	240
C	180	8
C	180	16
C	180	24
C	180	32
C	180	48
C	186	2
C	186	4
C	186	6
C	186	8
C	186	10
D	20	0
D	170	192
D	170	288
D	170	384
D	170	480
D	170	600
D	178	24
D	178	48
D	178	72
D	178	96

D	178	120
D	186	2
D	186	10
D	186	15
D	186	20
D	186	25
D	194	0,5
D	194	1,5
D	194	2
D	194	2,5
D	194	3

Tab. 3.1.1 Vzorky zkoumaných dielektrických materiálů, které byly podrobeny zrychlenému tepelnému stárnutí při různých teplotách a časech expozice

Principem dielektrické spektroskopie pro střídavé pole je sledování odezvy polarizace částic na základě změny frekvence vnějšího elektrického pole. Během experimentu byla vyhodnocována závislost impedance, reálné a imaginární složky komplexní permitivity, ztrátového činitele a měřené kapacity ( $C_p$ ) na frekvenci vnějšího elektrického pole.

## 3.2 Postup měření

Po kalibraci zařízení Agilent E4980A se do elektrodového systému pro pevné materiály přípravek 16451B umístil měřený dielektrický materiál. Po zapnutí měřicího cyklu došlo k měření dat. Data se ze zařízení Agilent E4980A ukládala přímo do počítače prostřednictvím USB kabelu. Po následné konfiguraci byl celý systém připraven na proměření dalšího vzorku.

Pomocí měřicího zařízení Agilent E4980A a elektrodového systému 16451B byly změřeny hodnoty veličin, které jsou důležité pro vyhodnocení dielektrických vlastností ( $\text{tg } \delta, \varphi, Z, C_p, R_p, C_s, R_s$ ). Z některých z těchto veličin (kapitola 3.2.2) byla spočítána hodnota veličin reálné a imaginární složky komplexní permitivity ( $\epsilon', \epsilon''$ ). Všechny uvedené veličiny jsou funkčně závislé na frekvenci. Pro účely této práce byly vyhodnoceny jen některé z těchto veličin [ $\epsilon' = f(f), \epsilon'' = f(f), \text{tg } \delta = f(f), Z = f(f), C_p = f(f), R_p = f(f)$ ].

### 3.2.1 Popis měřených dielektrických materiálů

Měření se provedlo na dielektrických materiálech A, B, C a D. A je přírodní organický dielektrický materiál na bázi celulózy vytvořený slisováním několika vrstev. Teplotní třída

tohoto materiálu je 120 °C. B je dvousložkový dielektrický materiál složený ze skleněných vláken a bromované epoxidové pryskyřice. Teplotní třída tohoto materiálu je 130 °C. C je tříložkový dielektrický materiál složený z kalcinovaného slídového papíru, skleněné tkaniny a epoxinovolakové pryskyřice. Teplotní třída tohoto materiálu je 155 °C. D je tříložkový dielektrický materiál složený z kalcinovaného slídového papíru, polyethylentereftalátové polymfolie a epoxinovolakové pryskyřice. Teplotní třída tohoto materiálu je 155 °C. Uvedená teplotní třída vyjadřuje maximální hodnotu teploty prostředí, pro kterou je dielektrický materiál vhodný. [2, 22]

### 3.2.2 Vztahy pro výpočet vlastností měřených dielektrických materiálů

Pro výpočet důležitých vlastností měřených dielektrických materiálů byly použity následující vzorce uvedené v rovnicích (3.2.1) až (3.2.4).

Pro výpočet kapacity vakuového deskového kondenzátoru platí vztah:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (3.2.1)$$

$\varepsilon_0 [F \cdot m^{-1}]$  je permitivita vakua,  $S [m^2]$  je průřez kruhových měrných elektrod a  $d [m]$  je vzdálenost elektrod.

Pro výpočet relativní permitivity vzorků platí vztah:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_r = \frac{C_p}{C_0} \quad (3.2.2)$$

$C_p [F]$  je měřená paralelní kapacita.

Pro výpočet imaginární části komplexní permitivity  $\varepsilon''(\omega) [-]$  platí vztahy:

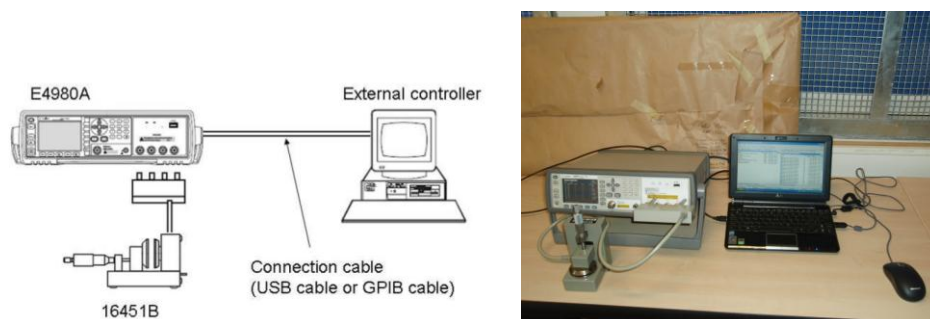
$$tg \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (3.2.3)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon'(\omega) \quad (3.2.4)$$

$\delta$  [°] je ztrátový úhel,  $\operatorname{tg} \delta$  [–] je ztrátový činitel,  $\varepsilon'(\omega)$  [–] je reálná část komplexní permitivity a  $\varepsilon''(\omega)$  [–] je imaginární část komplexní permitivity.

### 3.3 Použité měřicí přístroje a příslušenství

Při měření bylo použito zařízení Agilent E4980A, elektrodový systém 16451B, USB kabel a počítač (obr. 3.3.1).



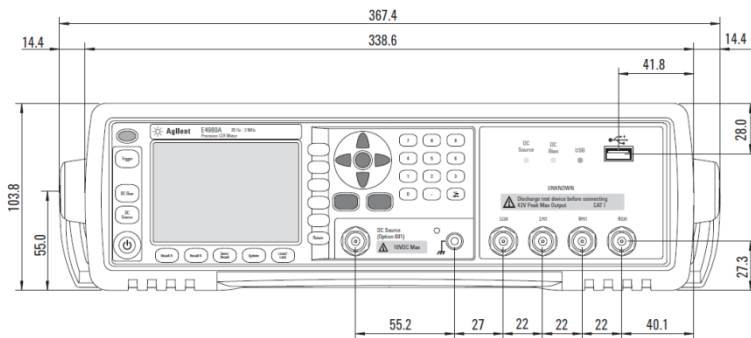
Obr. 3.3.1 Propojení zařízení Agilent E4980A, elektrodového systému 16451B a počítače během měření [21]

#### 3.3.1 Zařízení Agilent E4980A

Toto zařízení poskytuje dobrou kombinaci přesnosti a rychlosti pro široký rozsah aplikací. Zařízení E4980A (obr. 3.3.2) je LCR metr a představuje vhodný nástroj pro výrobní zkoušky komponent a materiálů. Rozsah frekvence zařízení je 20 Hz až 2 MHz. Na obr. 3.3.3 jsou rozměry zařízení E4980A uvedeny v milimetrech. [26]



Obr. 3.3.2 LCR metr E4980A [25]



Obr. 3.3.3 Rozměry LCR metru E4980A [25]

### 3.3.2 Elektrodotový systém 16451B

Elektrodotový systém 16451B (*obr. 3.3.4*) se používá pro měření dielektrických vlastností pevných materiálů a vyhovuje americké normě ASTM D150, která odpovídá české normě ČSN IEC 250. Elektrodotový systém 16451B využívá paralelních deskových elektrod, které společně s měřeným materiálem vytvoří kondenzátor. Pro měření byla zvolena metoda paralelního elektrodotového systému a s ní související kontaktní metoda. [18]



Obr. 3.3.4 Elektrodotový systém 16451B [19]

#### 3.3.2.1 Metoda paralelního elektrodotového systému

Při použití impedančního měřicího přístroje (LCR metr) se obvykle používá metoda paralelního elektrodotového systému, která umožňuje umístění tenkého plochého materiálu nebo kapaliny mezi dvě elektrodoty a vytvoří tak kondenzátor. Elektrodotový systém 16451B umožňuje umístění pouze pro pevné materiály. [18]

Když se měří dielektrický materiál mezi dvěma elektrodami, dochází na okrajích elektrod k rozptylu elektrického pole a naměřená kapacita je pak rozdílná od skutečné kapacity dielektrického materiálu. Řešením, jak odstranit chybu měření způsobenou rozptylem elektrického pole, je použití ochranné elektrody. Hlavní elektroda společně se zemní elektrodou, v případě použití ochranné elektrody, měří pouze homogenní elektrické pole mezi nimi. S použitím ochranné elektrody naměřená kapacita odpovídá skutečné kapacitě dielektrického materiálu. Jestliže hlavní elektroda je použita s ochranou elektrodou, hlavní elektrodě se pak říká měrná elektroda (*obr. 3.3.5*). [18]

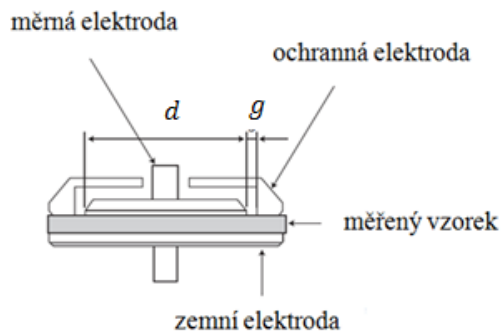
Existují tři měřicí metody, které jsou založené na principu metody paralelního elektrodového systému. Jedná se o kontaktní metodu, nekontaktní metodu a kontaktní metodu založenou na vytváření tenkých filmových elektrod na povrchu zkoušeného materiálu. Přehledné porovnání metod je uvedeno v *tab. 3.3.1*. Pro účely této práce je věnována větší pozornost jen kontaktní metodě, protože byla použita pro měření vzorků. [18]

	<b>Kontaktní metoda</b>	<b>Nekontaktní metoda</b>	<b>Kontaktní metoda (s tenkou filmovou elektrodou)</b>
<b>Přesnost</b>	Nízká	Střední	Vysoká
<b>Použitelný Materiál</b>	Pevný materiál s plochým a hladkým povrchem	Pevný materiál s plochým a hladkým povrchem	Materiál, kde je možné nanést tenkou filmovou elektrodu na jeho povrch

*Tab. 3.3.1 Přehledné porovnání měřících metod [18]*

### **3.3.2.2 Kontaktní elektrodová metoda**

Kontaktní elektrodová metoda (*obr. 3.3.5*) nevyžaduje žádnou přípravu materiálu a úkony při měření jsou jednoduché, proto je tato metoda velmi používaná. Může však dojít k značné chybě při měření, pokud se vytvoří vzduchová mezera a její vliv se nezveme v úvahu. [18]



Obr. 3.3.5 Kontaktní elektrodová metoda [18]

Když se zkoušený materiál vloží mezi elektrody, tak mezi vzorkem a elektrodami vznikne vzduchová mezera bez ohledu na to, jak dokonale ploché a paralelní jsou strany zkoušeného materiálu. Tato vzduchová mezera způsobuje určitou chybu měření, protože naměřená kapacita bude sériovým spojením kapacity dielektrika a vzduchové mezery. Velikost této chyby je naštěstí malá. [18]

Vliv vzduchové mezery je možno naprosto eliminovat použitím nekontaktní metody nebo tenkých filmových elektrod na povrchu dielektrika. Pomocí tenkých filmových elektrod je možné dosáhnout nejvyšší přesnosti měření. [18]

### 3.3.2.3 Základní specifikace 16451B

Základní specifikace elektrodového systému 16451B je uvedena v tab. 3.3.2. [18]

<b>Frekvence</b>	$f \leq 30 \text{ MHz}$
<b>Maximální napětí</b>	$U = \pm 42 \text{ V}$
<b>Pracovní teplota</b>	$t = 0 \text{ °C} - 55 \text{ °C}$
<b>Uspořádání výstupů</b>	Čtyři výstupy
<b>Kompenzace</b>	Naprázdko a nakrátko
<b>Váha</b>	$m = 3700 \text{ g}$
<b>Délka kabelu</b>	$l = 1 \text{ m}$

Tab. 3.3.2 Základní specifikace elektrodového systému 16451B [18, 19]

## Hlavní výhody 16451B

- Přesná měření jsou možná až do 30 MHz.
- Používá se ochranná elektroda k eliminaci rozptylu elektrického pole na okrajích kondenzátoru.
- Možná je kompenzace naprázdno a nakrátko.
- Tento elektrodový systém může být použit s jakýmkoliv impedančním měřicím zařízením se čtyřmi vstupy. [18]

## Druhy elektrod elektrodového systému 16451B

Horní elektroda se skládá z měrné a ochranné elektrody. Horní elektrody typu A a B se používají pro kontaktní elektrodovou metodu bez vytváření tenkých filmových elektrod na povrchu zkoušeného materiálu (*obr. 3.3.6*). Horní elektrody typu C a D lze užít pro kontaktní elektrodovou metodu s vytvářením tenkých filmových elektrod (*obr. 3.3.7*). Pro nekontaktní elektrodovou metodu se používají horní elektrody typu A a B (*obr. 3.3.8*). Při této metodě se doporučuje zpracovat dielektrický materiál na tloušťku několika milimetrů. [18]

Rozdíl mezi horními elektrodami typu A a B je v průměru. Rozdíl mezi horními elektrodami typu C a D je též v průměru. Horní elektrody typu A a C jsou přizpůsobeny pro velké vzorky a horní elektrody typu B a D jsou přizpůsobeny pro menší vzorky. Použitelné velikosti vzorků pro horní elektrody jsou uvedeny v *tab. 3.3.3*. Rozměry všech elektrodových systémů jsou uvedeny na *obr. 3.3.9* a *obr. 3.3.10*. Rozměr spodní (zemní) elektrody je ve všech těchto elektrodových systémech stejný. [18]

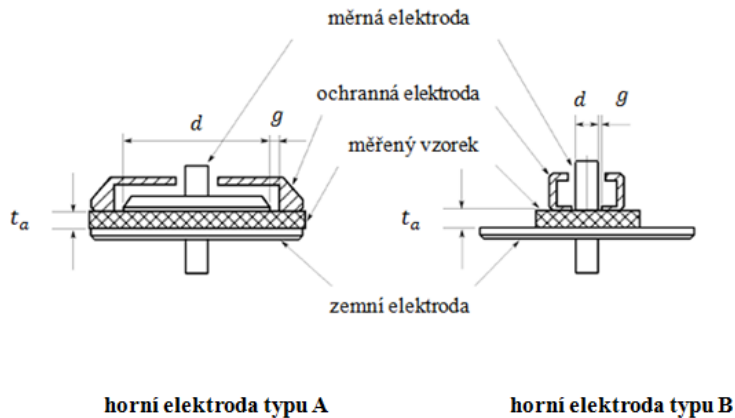
Měření probíhalo pomocí elektrodového systému s typem horní elektrody A a formou kontaktní metody. Dielektrický materiál pro toto měření musel být pevný, plochý a hladký se stejnou tloušťkou od jednoho konce k druhému. [18]

Pro přehlednost a porovnání jsou zde uvedeny všechny možnosti měření. Elektrodový systém 16451B má zemní, měrnou a ochrannou elektrodu. Jak již bylo uvedeno, ochranná elektroda obklopuje měrnou elektrodu a umožňuje přesné měření kapacity dielektrika. [18]

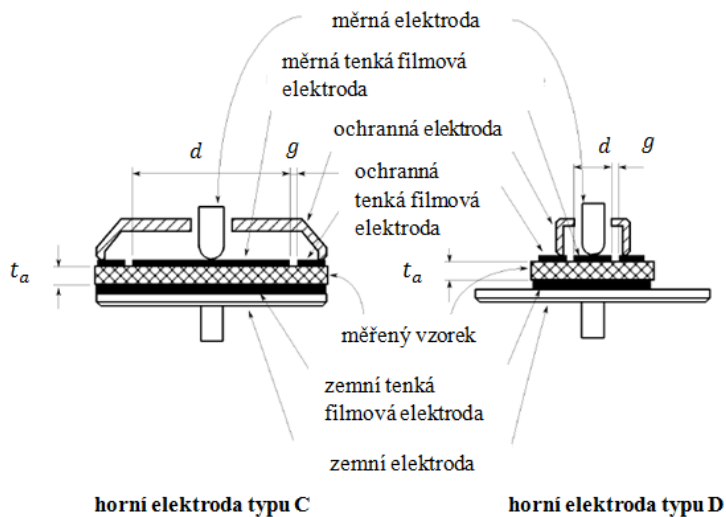


Typ horní elektrody	Tloušťka materiálu	Minimální průměr měřených materiálů	Průměr měrné elektrody
A	$t \leq 10 \text{ mm}$	40 mm	38 mm
B	$t \leq 10 \text{ mm}$	10 mm	5 mm
C	$t \leq 10 \text{ mm}$	56 mm	5 mm až 50 mm
D	$t \leq 10 \text{ mm}$	20 mm	5 mm až 14 mm

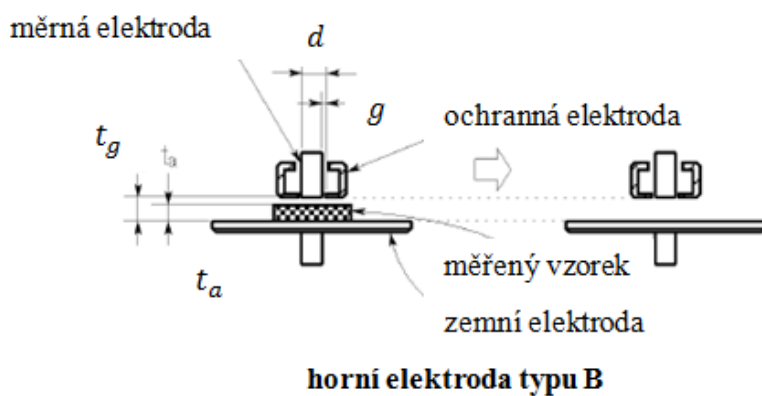
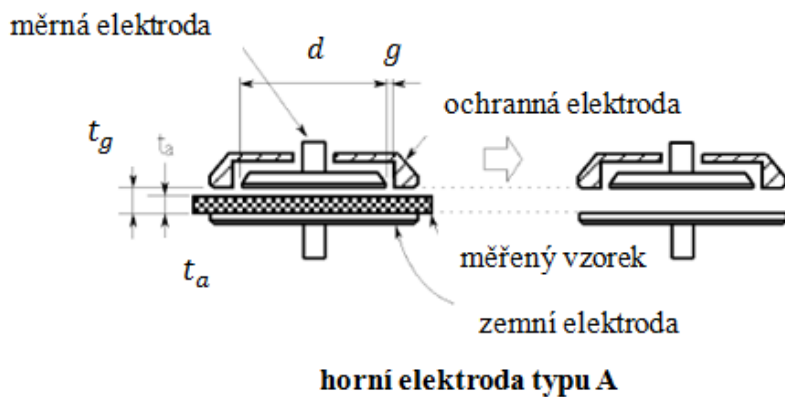
Tab. 3.3.3 Povolené rozměry materiálů pro měření a rozměry měrných elektrod A až D [18]



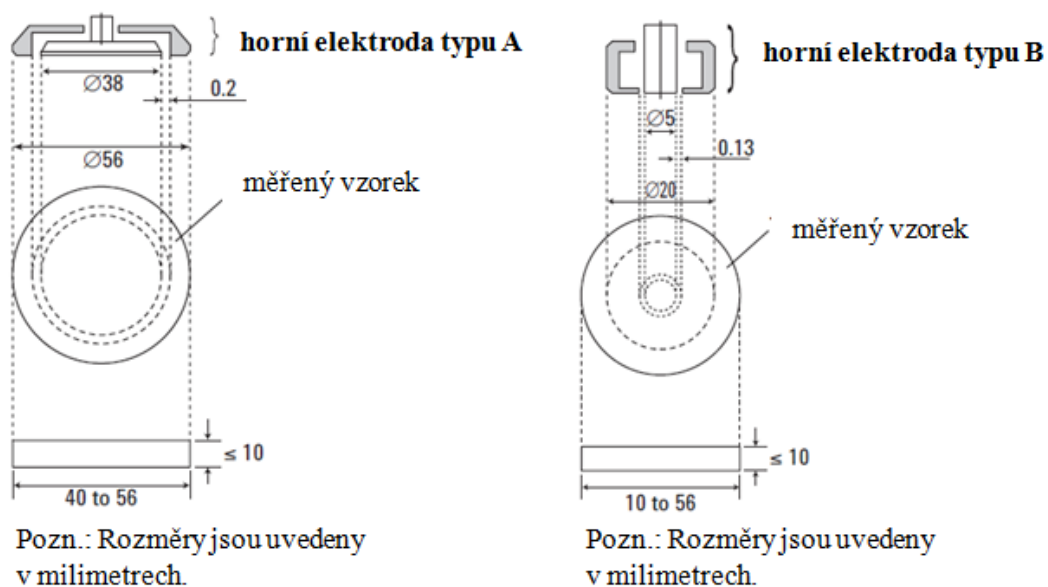
Obr. 3.3.6 Elektrodivý systém pro kontaktní elektrodovou metodu [20]



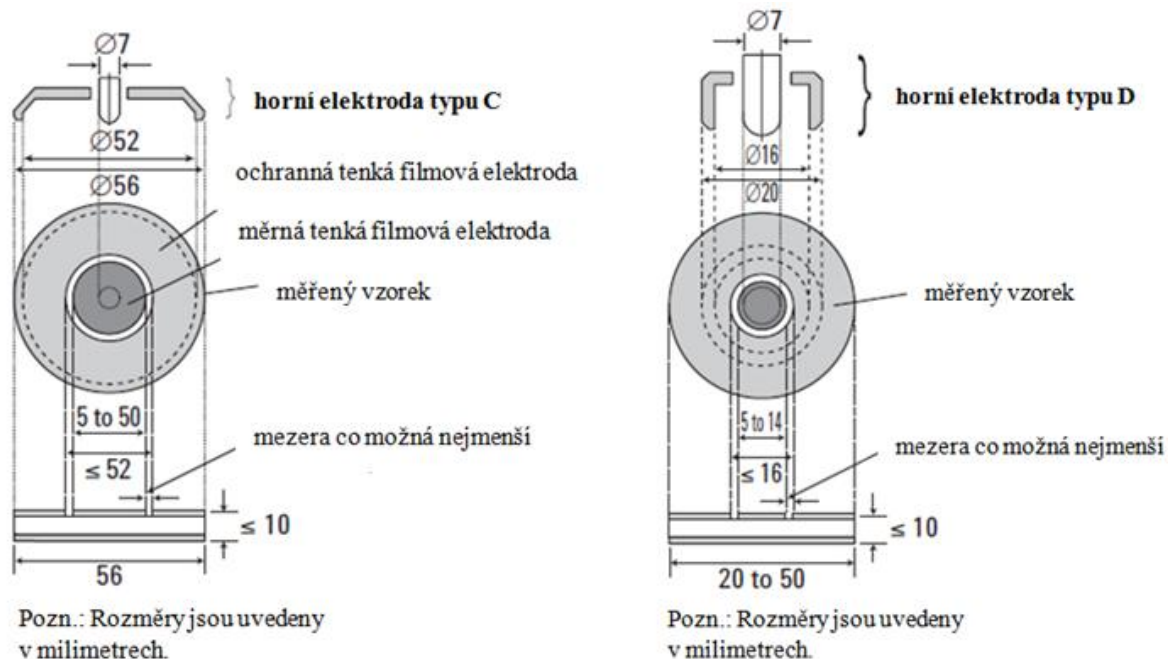
Obr. 3.3.7 Elektrodivý systém pro kontaktní elektrodovou metodu s vytvořenými tenkými filmovými elektrodami na povrchu materiálu [20]



Obr. 3.3.8 Elektrodotý systém pro nekontaktní elektrodovou metodu [20]



Obr. 3.3.9 Rozměry elektrodového systému s horními elektrodami typu A a B [18]



Obr. 3.3.10 Rozměry elektrodového systému s horními elektrodami typu C a D [18]

### 3.4 Vyhodnocení výsledků měření

Vyhodnocení výsledků měření spočívá v porovnávání vytvořených grafů dielektrických vlastností získaných pomocí naměřených dat a výpočtů. Teplotní třídy měřených dielektrických materiálů (kapitola 3.2.1) jsou menší než teploty zrychleného tepelného stárnutí. Cílem vyhodnocení výsledků měření je určit vliv teploty na měřené dielektrické materiály.

#### 3.4.1 Teoretické předpoklady

Relativní permitivita klesá s rostoucí frekvencí. Ztrátový činitel a ztrátové číslo s frekvencí nejprve stoupají a po dosažení určitého vrcholu klesají. Paralelní odpor v náhradním obvodu odpovídá celkovým ztrátám v kondenzátoru a s rostoucí frekvencí klesá. Paralelní kapacita s rostoucí frekvencí také klesá. S klesající paralelní kapacitou klesá i relativní permitivita. Celková velikost komplexní impedance je dána v tomto případě paralelní kombinací komplexní impedance paralelního odporu a komplexní impedance paralelní kapacity. Celková velikost komplexní impedance s rostoucí frekvencí klesá.

### 3.4.2 První typ vyhodnocovaných grafů

Tyto grafy jsou závislostí  $\varepsilon' = f(f)$ ,  $\varepsilon'' = f(f)$ ,  $\text{tg } \delta = f(f)$ ,  $Z = f(f)$ ,  $C_p = f(f)$ ,  $R_p = f(f)$  a parametrem v těchto grafech je různý čas expozice a jedna teplota stárnutí.

Pro efektivní porovnání dielektrických materiálů mezi sebou z hlediska hodnoty určitých dielektrických vlastností byla zvolena taková teplota tepelného stárnutí materiálů, která je u všech těchto dielektrických materiálů stejná. Jedná se o teplotu 170 °C.

Všechny grafy vlastností dielektrických materiálů byly původně v rozsahu frekvence od 20 Hz do 2 MHz. Z důvodu nepřesnosti při nízkých frekvencích byly všechny grafy vyhodnoceny až od frekvence 130 Hz. U dielektrických materiálů D byly hodnoty ztrátového čísla, ztrátového činitele a paralelního odporu vyhodnoceny až od frekvence přibližně 1300 Hz. U těchto dielektrických vlastností totiž vyšly z neznámého důvodu záporné hodnoty, které jsou nepřijatelné a musely být v grafech oříznuty. U všech měřených dielektrických materiálů (kromě dielektrických materiálů A) byly k dispozici i vzorky v dodaném stavu. Dodaný stav znamená, že dielektrické materiály nebyly vystaveny žádnému tepelnému stárnutí. Teplota dielektrických materiálů v dodaném stavu je 20 °C.

#### 3.4.2.1 Vyhodnocení relativní permitivity

Při vyhodnocování průběhů relativní permitivity dielektrických materiálů je důležitá maximální i minimální hodnota této veličiny. U všech měřených dielektrických materiálů s rostoucí frekvencí relativní permitivita podle předpokladů klesá.

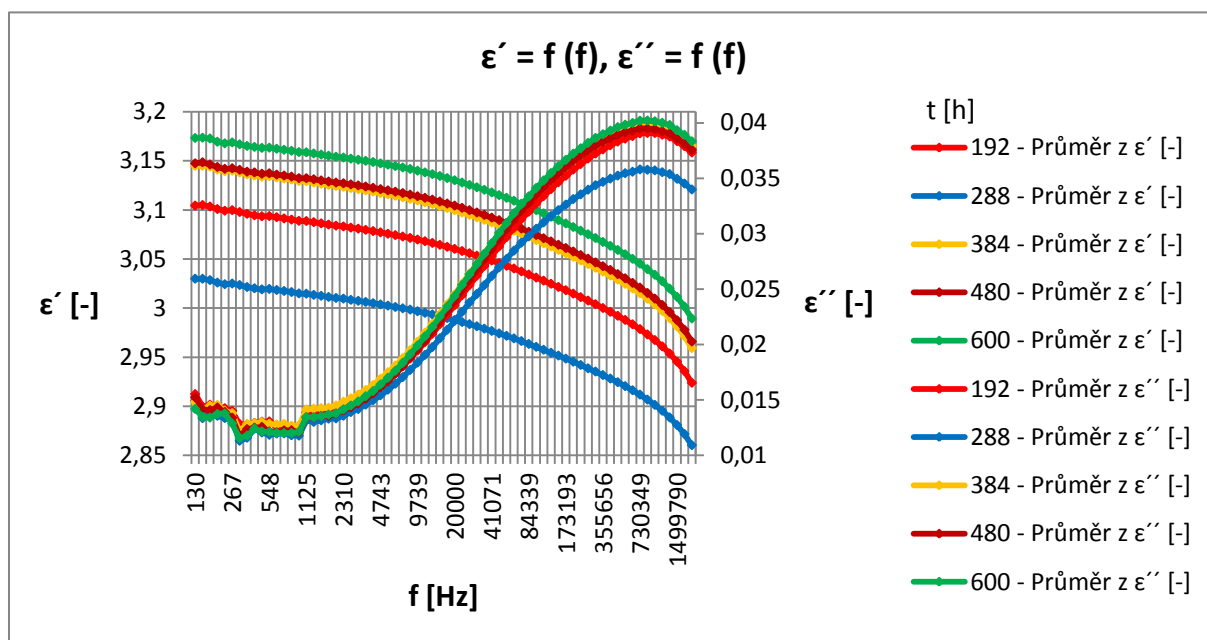
#### **Vyhodnocení relativní permitivity u dielektrických materiálů s teplotou stárnutí 170 °C**

U dielektrických materiálů C s rostoucím časem expozice roste i relativní permitivita. U dielektrických materiálů A se celkový trend růstu nebo poklesu relativní permitivity s rostoucím časem expozice nedá určit. U dielektrických materiálů B s rostoucím časem expozice relativní permitivita klesá. U dielektrických materiálů D se celkový trend růstu nebo poklesu relativní permitivity s rostoucím časem expozice nedá určit. Pořadí dielektrických materiálů podle rozdílu maximální a minimální hodnoty relativní permitivity je B, D, C, A. Hodnoty vychází u dielektrických materiálů D a C téměř shodně. Nejnížší hodnotu mají dielektrické materiály A. Porovnávaly se průběhy, které jsou v jednotlivých grafech nejvýše a

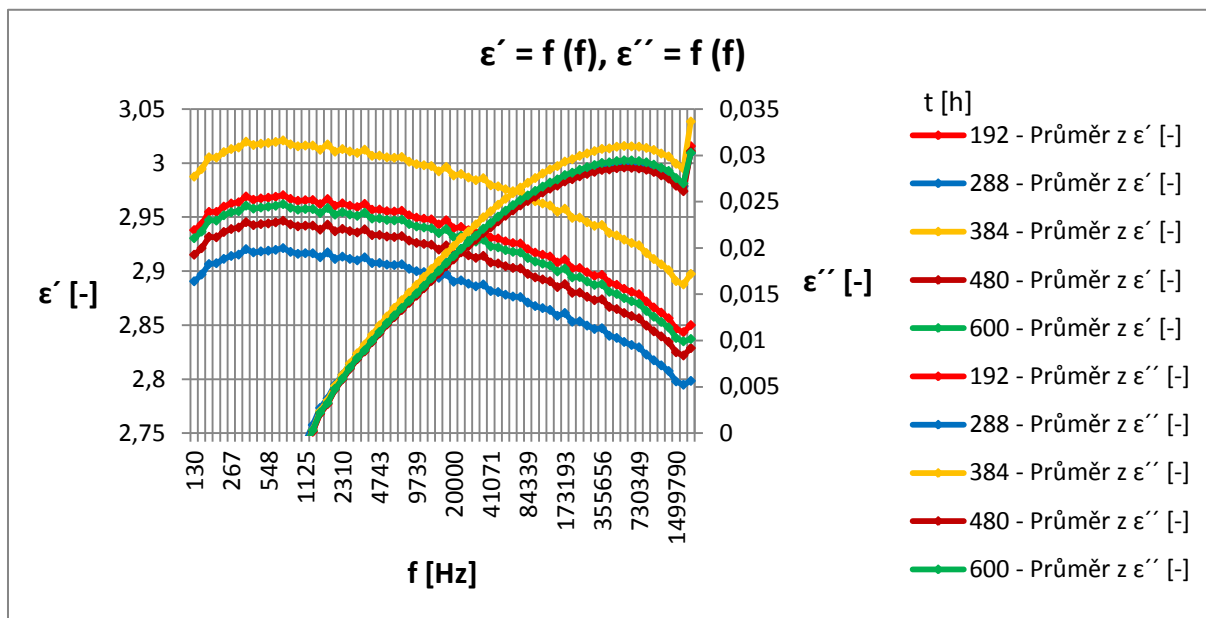
nejníže položené a obě porovnání vykazují stejné výsledky. Nejstrměji tedy klesá s frekvencí relativní permitivita dielektrických materiálů B a nejméně strmě klesá s frekvencí relativní permitivita dielektrických materiálů A.

S rostoucím časem expozice rozdíl maximální a minimální hodnoty relativní permitivity u dielektrických materiálů B poměrně razantně klesá. S rostoucím časem expozice rozdíl maximální a minimální hodnoty relativní permitivity u dielektrických materiálů C mírně roste. U dielektrických materiálů D a A nelze jednoznačně určit trend růstu nebo poklesu rozdílu maximální a minimální hodnoty relativní permitivity v návaznosti na časy expozice. Pořadí měřených dielektrických materiálů podle velikosti relativní permitivity od největší hodnoty po nejmenší v těchto grafech je B, D, C, A. Toto pořadí bylo určeno tak, že se vypočetl průměr všech maximálních hodnot relativní permitivity v jednotlivých grafech a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnály.

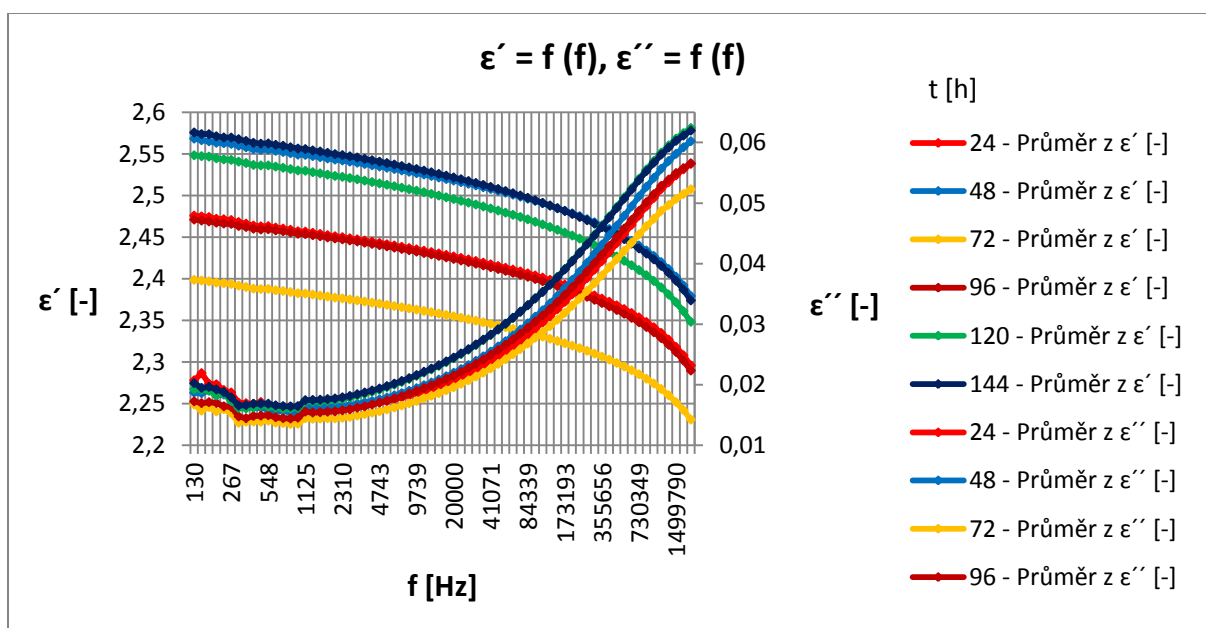
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



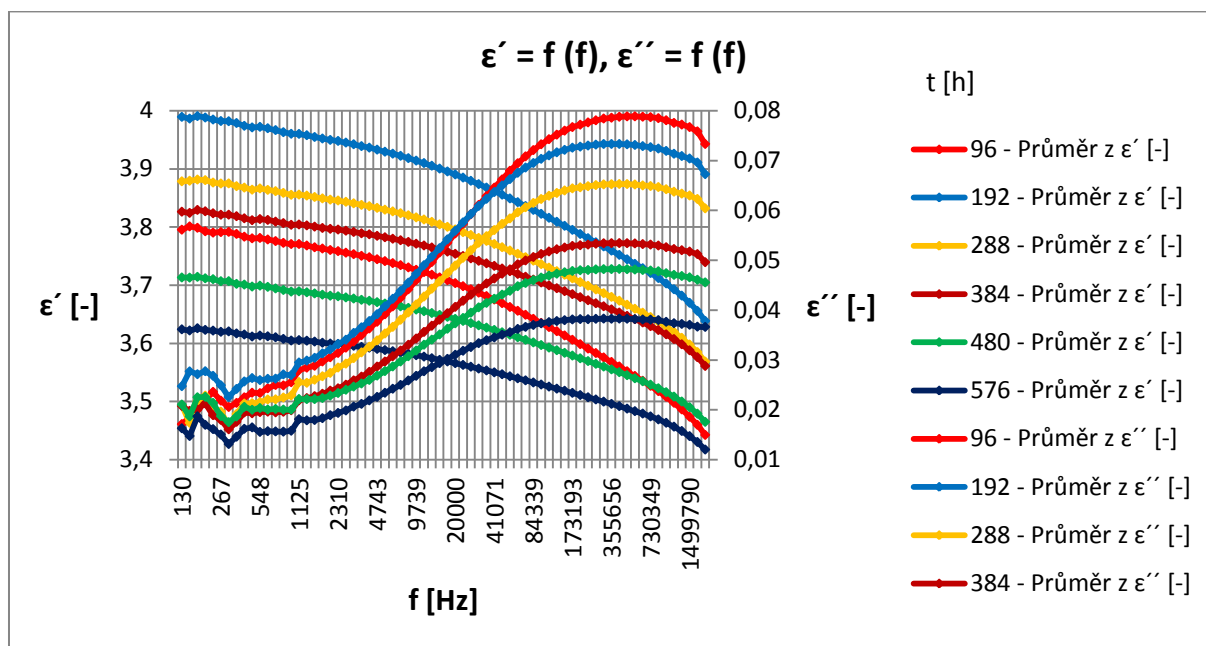
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=72 h (oranžová) t=96 h (tmavě červená) t=120 h (zelená) t=144 h (tmavě modrá)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=96 h (červená) t=192 h (modrá) t=288 h (oranžová) t=384 h (tmavě červená) t=480 h (zelená) t=576 h (tmavě modrá)



### Celkové vyhodnocení relativní permitivity dielektrických materiálů

Toto vyhodnocení se uskutečnilo u všech grafů včetně grafů v přílohách 1-12. V jednotlivých grafech pro většinu teplot stárnutí a většinu dielektrických materiálů neplatí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i jejich relativní permitivita. V jednotlivých grafech se vypočetl průměr maximálních hodnot relativní permitivity v různých časech expozice a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

U dielektrických materiálů C s tepelným stárnutím 170 °C, 175 °C, 180 °C a 186 °C se relativní permitivita téměř nemění. U vyhodnocení relativní permitivity dielektrických materiálů C s teplotou stárnutí 170 °C je napsáno, že celkový trend je takový, že s rostoucím časem expozice, roste i relativní permitivita. To platí pouze pro teplotu stárnutí 170 °C, protože se tento trend u tepelného stárnutí 175 °C, 180 °C a 186 °C nedá určit. Relativní permitivita dielektrických materiálů C v dodaném stavu je o něco menší než u dielektrických materiálů podrobených tepelnému stárnutí. U dielektrických materiálů D s tepelným stárnutím 170 °C, 178 °C a 186 °C se relativní permitivita mírně zvyšuje a u dielektrických materiálů s

tepelným stárnutím 194 °C se naopak trochu sníží. Relativní permitivita dielektrických materiálů D v dodaném stavu je o něco větší než u dielektrických materiálů podrobených tepelnému stárnutí.

U dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C, 190 °C se relativní permitivita mírně zvyšuje a u dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 200 °C se naopak trochu sníží. U vyhodnocení relativní permitivity dielektrických materiálů A s teplotou stárnutí 170 °C je uvedeno, že se celkový trend nedá určit. To platí pouze pro teplotu stárnutí 170 °C, protože u tepelného stárnutí 180 °C, 190 °C a 200 °C s rostoucím časem expozice relativní permitivita klesá. Relativní permitivita dielektrických materiálů B v dodaném stavu a s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C se mírně zvyšuje a u dielektrických materiálů B s tepelným stárnutím 190 °C a 200 °C se trochu sníží. U všech dielektrických materiálů B s rostoucím časem expozice relativní permitivita klesá, toto platí pro všechny teploty stárnutí dielektrických materiálů B. Pořadí měřených dielektrik podle velikosti relativní permitivity od největší hodnoty po nejmenší je B, D, C, A.

#### **3.4.2.2 Vyhodnocení ztrátového čísla**

Při vyhodnocování průběhů ztrátového čísla dielektrických materiálů je důležitá maximální hodnota této veličiny a frekvence, kdy k tomuto maximu dojde.

#### **Vyhodnocení ztrátového čísla u dielektrických materiálů s teplotou stárnutí 170°C**

U dielektrických materiálů C s rostoucím časem expozice roste i ztrátové číslo. U dielektrických materiálů D se celkový trend růstu nebo poklesu ztrátového čísla nedá určit. U dielektrických materiálů A se celkový trend růstu nebo poklesu ztrátového čísla rovněž nedá určit. U dielektrických materiálů B s rostoucím časem expozice ztrátové číslo klesá. Frekvence, kdy je dosaženo maximální hodnoty ztrátového čísla, je u dielektrických materiálů C, B a D přibližně stejná, ale u dielektrických materiálů A je značně vyšší. Skutečnou maximální hodnotu ztrátového čísla dielektrických materiálů A se nepodařilo změřit, protože bylo měřeno do frekvence 2 MHz a skutečný vrchol ztrátového čísla se nachází někde za touto hodnotou. Pro potřeby srovnávání dielektrických materiálů mezi sebou je za maximální hodnotu ztrátového čísla dielektrických materiálů A považována nejvyšší naměřená hodnota. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti ztrátového čísla od největší hodnoty po nejmenší v těchto grafech je A, B, C, D. Hodnota ztrátového čísla dielektrických materiálů A a B zůstává téměř stejná. Toto pořadí bylo určeno tak, že se vypočetl průměr všech



maximálních hodnot ztrátového čísla v jednotlivých grafech a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

### **Celkové vyhodnocení ztrátového čísla dielektrických materiálů**

Toto vyhodnocení se uskutečnilo u všech grafů včetně grafů v přílohách (1-12). V jednotlivých grafech pro většinu teplot stárnutí a většinu dielektrických materiálů neplatí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i ztrátové číslo. V jednotlivých grafech se vypočetl průměr maximálních hodnot ztrátového čísla v různých časech expozice a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

U dielektrických materiálů C s tepelným stárnutím 170 °C, 175 °C, 180 °C a 186 °C se ztrátové číslo téměř nemění. U vyhodnocení dielektrických materiálů C s teplotou stárnutí 170 °C je udáno, že s rostoucím časem expozice roste i ztrátové číslo. To platí pouze pro teplotu stárnutí 170 °C, protože se tento trend u tepelného stárnutí 175 °C, 180 °C a 186 °C nedá určit. Ztrátové číslo dielektrických materiálů C v dodaném stavu je o něco menší než u vzorků podrobených tepelnému stárnutí. U dielektrických materiálů D s tepelným stárnutím 170 °C, 178 °C, 186 °C a 194 °C se ztrátové číslo také téměř nemění. U vyhodnocení ztrátového čísla dielektrických materiálů D s teplotou stárnutí 170 °C je dáno, že celkový trend nelze určit. To platí pro teplotu stárnutí 170 °C, 178 °C a 186 °C, protože u tepelného stárnutí 194 °C s rostoucím časem expozice ztrátové číslo klesá. Ztrátové číslo dielektrických materiálů D v dodaném stavu je o něco větší než u vzorků podrobených tepelnému stárnutí.

U dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C se ztrátové číslo téměř nemění. U vyhodnocení ztrátového čísla dielektrických materiálů A s teplotou stárnutí 170 °C se celkový trend růstu nebo poklesu nedá určit. To platí pouze pro teplotu stárnutí 170 °C, protože u tepelného stárnutí 180 °C, 190 °C a 200 °C je celkový trend takový, že s rostoucím časem expozice ztrátové číslo klesá. U dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C se ztrátové číslo mírně zvyšuje. U všech dielektrických materiálů B s rostoucím časem expozice ztrátové číslo klesá. Tvrzení platí pro všechny teploty stárnutí dielektrických materiálů B. Ztrátové číslo dielektrických materiálů B v dodaném stavu je o něco větší než u dielektrických materiálů B podrobených tepelnému stárnutí. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti ztrátového čísla od největší hodnoty po nejmenší je A, B, D, C.

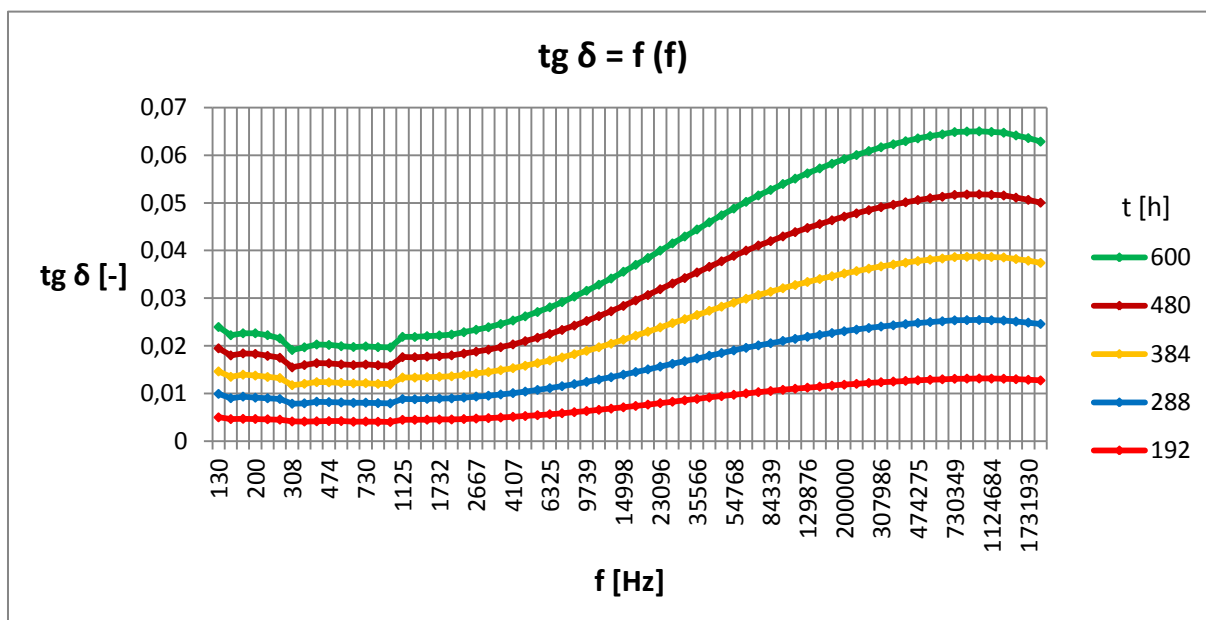
### **3.4.2.3 Vyhodnocení ztrátového činitele**

Při vyhodnocování průběhů ztrátového čísla dielektrických materiálů je důležitá maximální hodnota této veličiny a frekvence, kdy k tomuto maximu dojde.

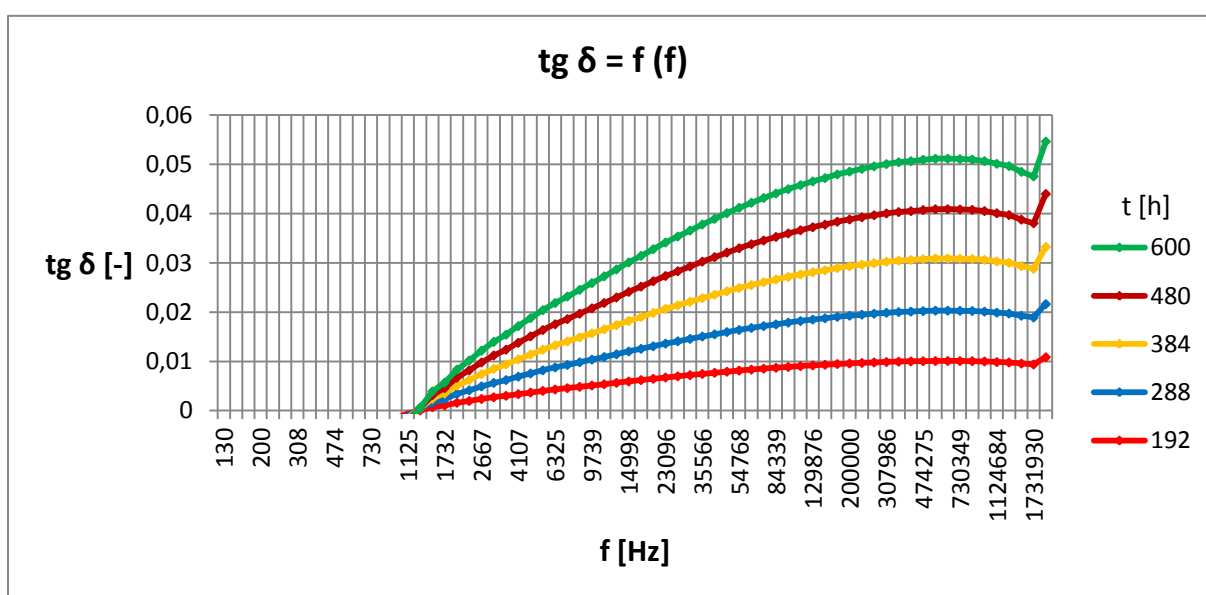
#### **Vyhodnocení ztrátového činitele u dielektrických materiálů s teplotou stárnutí 170°C**

Ve všech grafech platí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i ztrátový činitel. Frekvence, kdy je dosaženo maximální hodnoty ztrátového činitele, je u dielektrických materiálů C, B a D přibližně stejná, ale u dielektrických materiálů A je značně vyšší. Skutečnou maximální hodnotu ztrátového činitele dielektrických materiálů A se nepodařilo změřit, protože bylo měřeno do frekvence 2 MHz a skutečný vrchol se nachází někde za touto hodnotou. Pro potřeby srovnávání dielektrických materiálů mezi sebou, je za maximální hodnotu ztrátového činitele dielektrických materiálů A považována nejvyšší naměřená hodnota. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti ztrátového činitele od největší hodnoty po nejmenší je A, B, C a D. Toto pořadí bylo určeno tak, že se vypočetl průměr všech maximálních hodnot ztrátového činitele v jednotlivých grafech a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

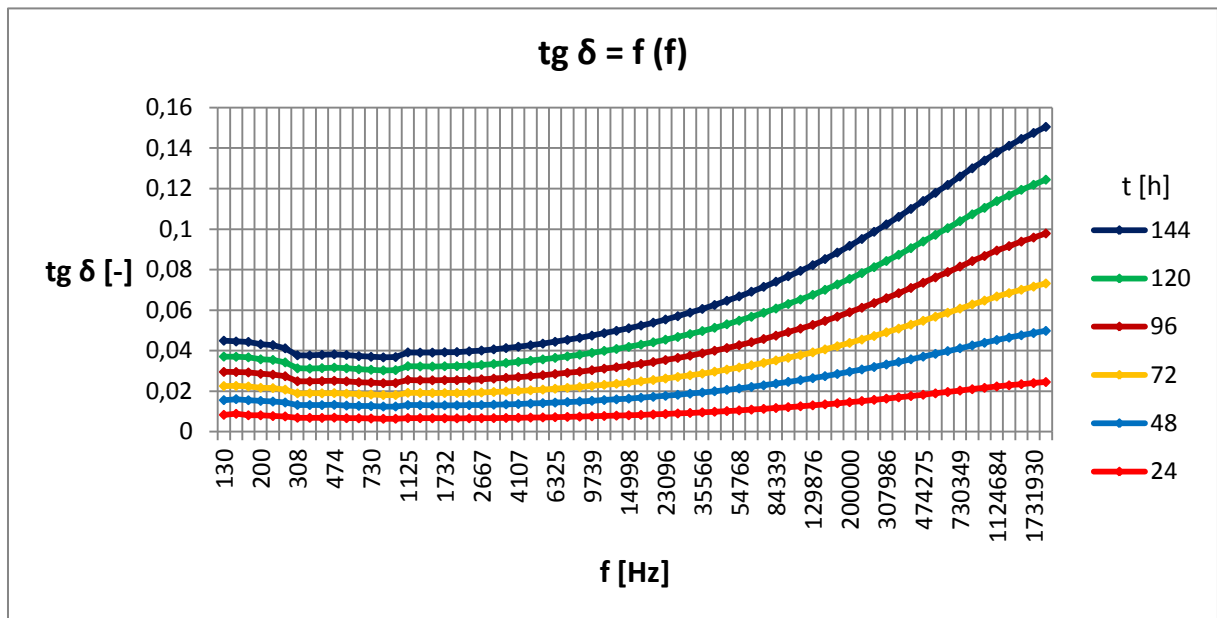
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



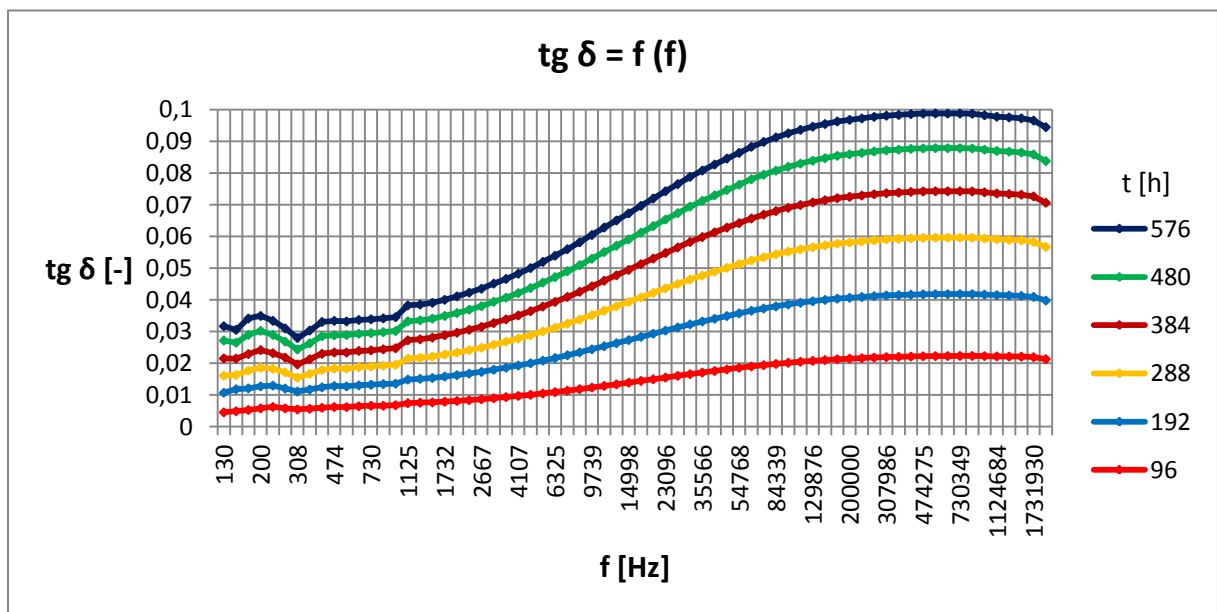
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=72 h (oranžová) t=96 h (tmavě červená) t=120 h (zelená) t=144 h (tmavě modrá)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=96 h (červená) t=192 h (modrá) t=288 h (oranžová) t=384 h (tmavě červená) t=480 h (zelená) t=576 h (tmavě modrá)



## **Celkové vyhodnocení ztrátového činitele dielektrických materiálů**

Toto vyhodnocení bylo provedeno u všech grafů včetně grafů v přílohách 1-12. V jednotlivých grafech pro všechny teploty stárnutí a všechny dielektrické materiály platí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i jejich ztrátový činitel. V jednotlivých grafech se vypočetl průměr maximálních hodnot ztrátových činitelů v různých časech expozice a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

U dielektrických materiálů C s tepelným stárnutím 170 °C, 175 °C, 180 °C a 186 °C je ztrátový činitel zhruba na stejné úrovni. Ztrátový činitel dielektrických materiálů C v dodaném stavu je o jedno desetinné místo menší než u dielektrických materiálů C podrobených tepelnému stárnutí. Ztrátový činitel u dielektrických materiálů D se s různým tepelným stárnutím také téměř nemění. Tepelné stárnutí dielektrických materiálů D bylo 170 °C, 178 °C, 186 °C a 194 °C. Ztrátový činitel dielektrických materiálů D v dodaném stavu je o něco větší než u dielektrických materiálů D podrobených tepelnému stárnutí.

Ztrátový činitel dielektrických materiálů A se s tepelným stárnutím 180 °C, 190 °C a 200 °C téměř nemění. Při tepelném stárnutí dielektrických materiálů A při 170 °C je ztrátový činitel o něco větší než u předchozích teplot stárnutí. U dielektrických materiálů B, které byly vystaveny zrychlenému tepelnému stárnutí o teplotách 170 °C, 180 °C, 190 °C, je ztrátový činitel téměř stejný. Při teplotě stárnutí 200 °C došlo k jeho mírnému snížení. Ztrátový činitel dielektrických materiálů B v dodaném stavu je o něco menší, než u dielektrických materiálů B podrobených tepelnému stárnutí. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti ztrátového činitele od největší hodnoty po nejmenší je A, B, D, C.

### **3.4.2.4 Vyhodnocení paralelní kapacity**

Při vyhodnocování průběhů paralelní kapacity dielektrických materiálů je důležitá maximální i minimální hodnota této veličiny. U všech měřených dielektrických materiálů s rostoucí frekvencí paralelní kapacita podle předpokladů klesá.

### **Vyhodnocení paralelní kapacity u dielektrických materiálů s teplotou stárnutí**

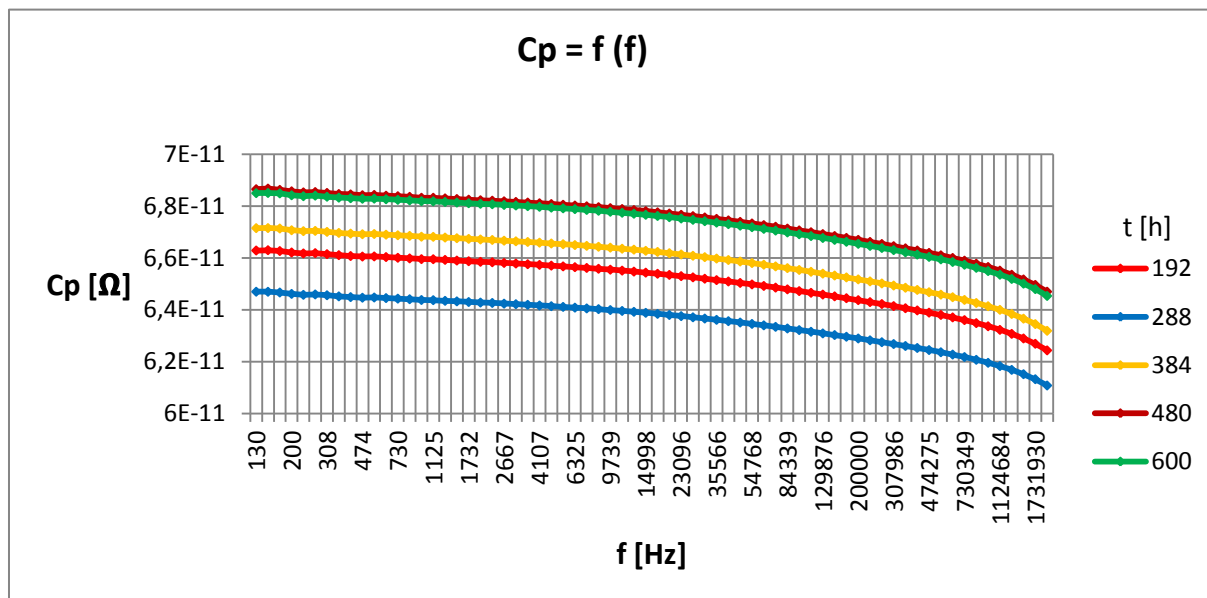
#### **170 °C**

U dielektrických materiálů C s rostoucím časem expozice roste i paralelní kapacita. U dielektrických materiálů D se celkový trend růstu nebo poklesu paralelní kapacity nedá určit.

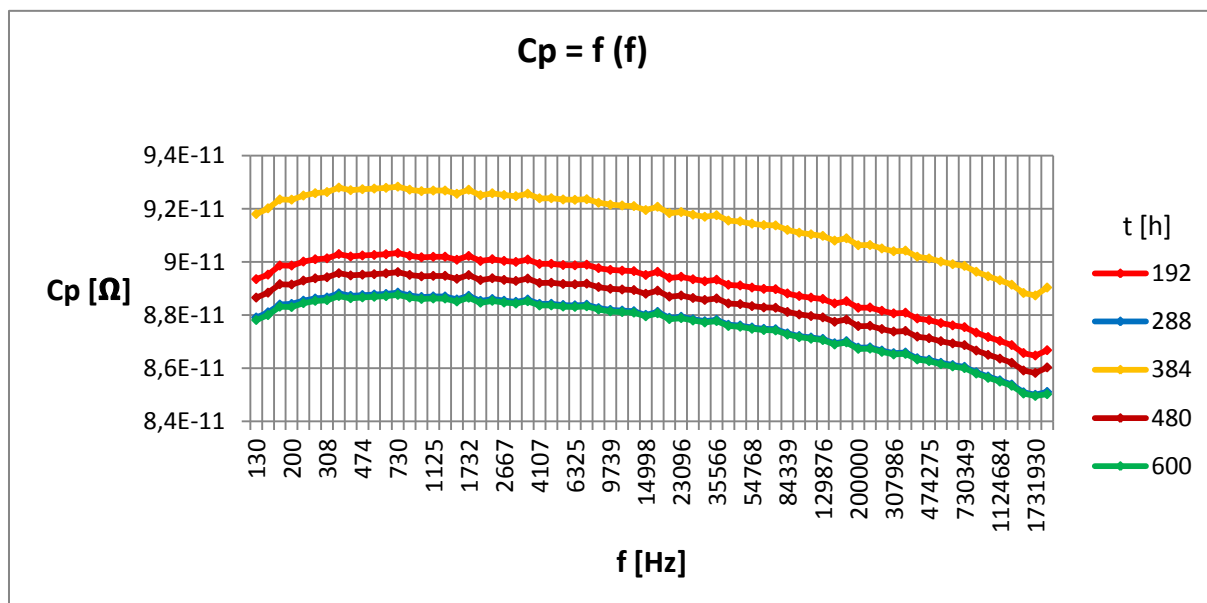
U dielektrických materiálů A se celkový trend růstu nebo poklesu paralelní kapacity rovněž nedá určit. U dielektrických materiálů B je celkový trend takový, že s rostoucím časem expozice paralelní kapacita klesá.

Pořadí dielektrických materiálů podle rozdílu maximální a minimální hodnoty u průběhů paralelní kapacity se liší podle umístění jednotlivých průběhů v grafech. Porovnávaly se průběhy, které jsou v jednotlivých grafech nejvýše a nejnižše položené. Obě porovnání vykazují různé výsledky. Pořadí dielektrických materiálů podle rozdílu maximální a minimální hodnoty nejvýše položeného průběhu paralelní kapacity od největší hodnoty po nejmenší je D, C, A, B. Pořadí dielektrických materiálů podle rozdílu maximální a minimální hodnoty nejnižše položeného průběhu paralelní kapacity od největší hodnoty po nejmenší je C, D, A, B. S rostoucím časem expozice rozdíl maximální a minimální hodnoty paralelní kapacity u dielektrických materiálů B mírně klesá. S rostoucím časem expozice rozdíl maximální a minimální hodnoty paralelní kapacity u dielektrických materiálů C mírně roste. U dielektrických materiálů D a dielektrických materiálů A nelze jednoznačně určit trend růstu nebo poklesu rozdílu maximální a minimální hodnoty paralelní kapacity v návaznosti na časy expozice. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti paralelní kapacity od největší hodnoty po nejmenší v těchto grafech je B, A, C, D. Toto pořadí bylo určeno tak, že se vypočetl průměr všech maximálních hodnot paralelních kapacit v jednotlivých grafech a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnály.

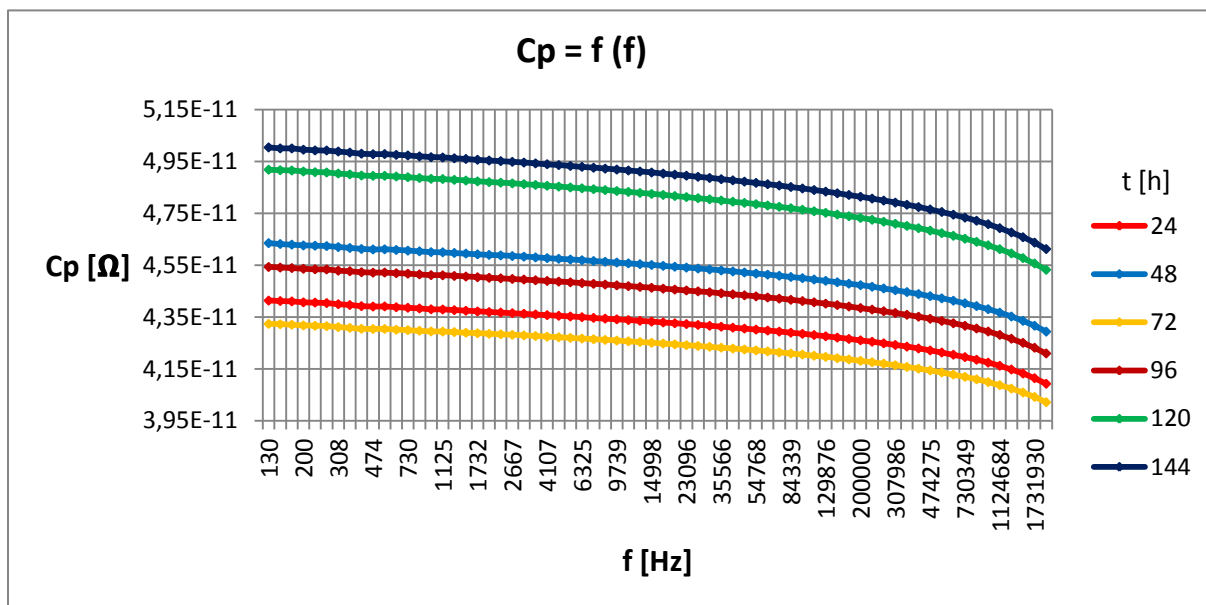
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



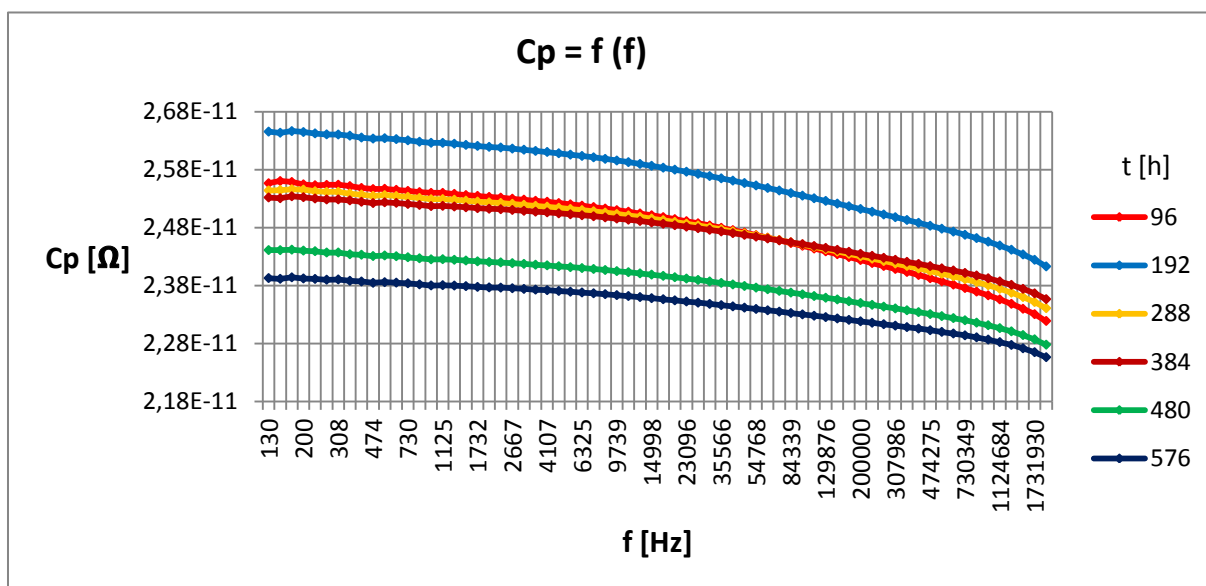
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=72 h (oranžová) t=96 h (tmavě červená) t=120 h (zelená) t=144 h (tmavě modrá)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=96 h (červená) t=192 h (modrá) t=288 h (oranžová) t=384 h (tmavě červená) t=480 h (zelená) t=576 h (tmavě modrá)





## **Celkové vyhodnocení paralelní kapacity dielektrických materiálů**

Toto vyhodnocení se uskutečnilo u všech grafů včetně grafů v přílohách 1-12. V jednotlivých grafech pro všechny teploty stárnutí a všechny dielektrické materiály neplatí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i jejich paralelní kapacita. V jednotlivých grafech se vypočetl průměr maximálních hodnot paralelní kapacity v různých časech expozice. Tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

Paralelní kapacita dielektrických materiálů C s tepelným stárnutím 170 °C, 175 °C, 180 °C a 186 °C neustále klesá. Paralelní kapacita dielektrických materiálů C v dodaném stavu je o něco větší než u dielektrických materiálů C podrobených tepelnému stárnutí. Paralelní kapacita dielektrických materiálů D je s tepelným stárnutím 170 °C, 178 °C a 186 °C téměř stejná. Pro dielektrické materiály D s tepelným stárnutím 194 °C se zmenší. Paralelní kapacita dielektrických materiálů D v dodaném stavu je o něco menší než u dielektrických materiálů D podrobených tepelnému stárnutí. Paralelní kapacita dielektrických materiálů A je s tepelným stárnutím 180 °C, 190 °C a 200 °C téměř stejná. U dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 170 °C je paralelní kapacita o něco nižší než u ostatních teplot stárnutí. Paralelní kapacita dielektrických materiálů B s tepelným stárnutím 20 °C, 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C (včetně dodaného stavu) se téměř nemění. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti kapacity od největší hodnoty po nejmenší je B, A, C, D.

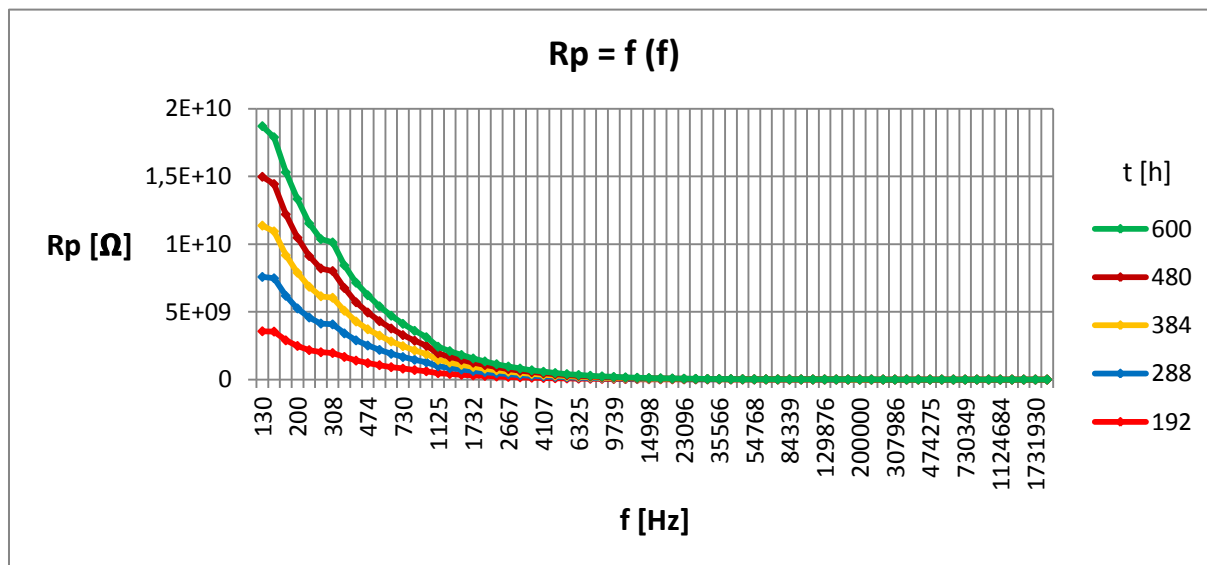
### **3.4.2.5 Vyhodnocení paralelního odporu**

Při vyhodnocování průběhů paralelního odporu dielektrických materiálů je důležitá maximální hodnota této veličiny. U všech měřených dielektrických materiálů s rostoucí frekvencí paralelní odpor podle předpokladů klesá.

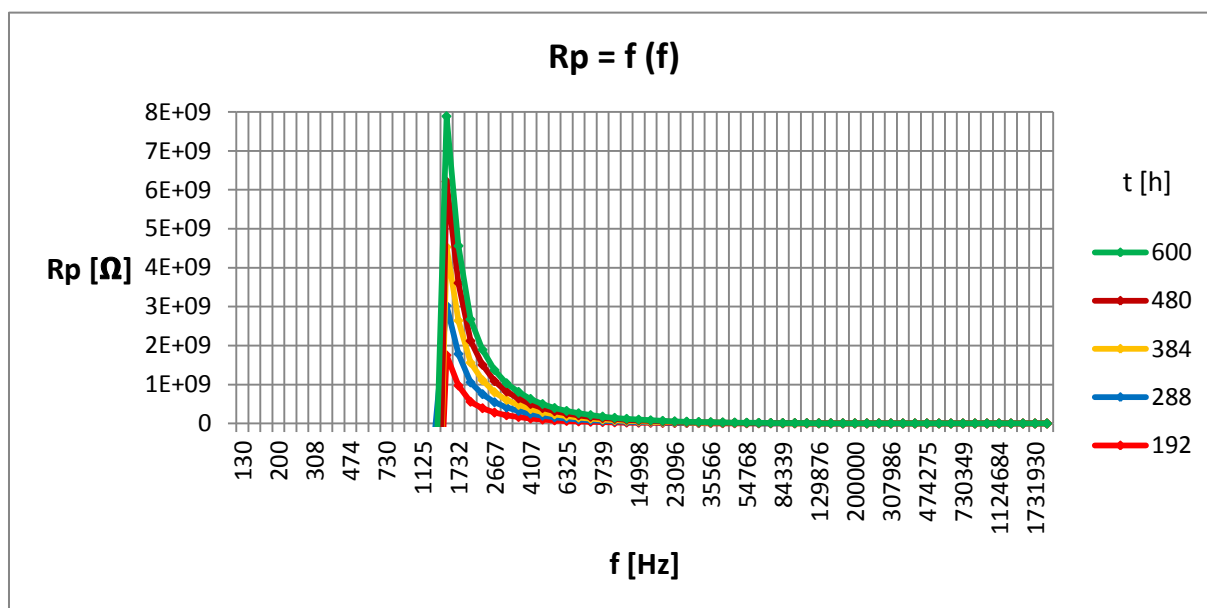
#### **Vyhodnocení paralelního odporu u dielektrických materiálů s teplotou stárnutí 170 °C**

Ve všech grafech platí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i paralelní odpor. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti paralelního odporu od největší hodnoty po nejmenší je B, A, C, D. Toto pořadí bylo určeno výpočtem průměru všech maximálních hodnot paralelního odporu v jednotlivých grafech. Tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

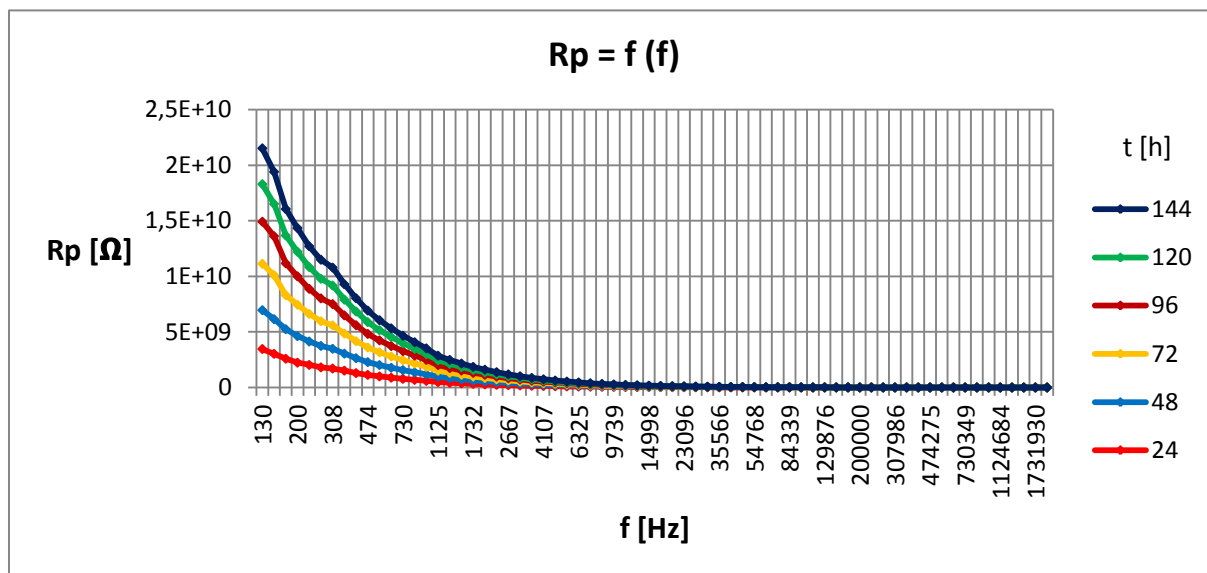
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



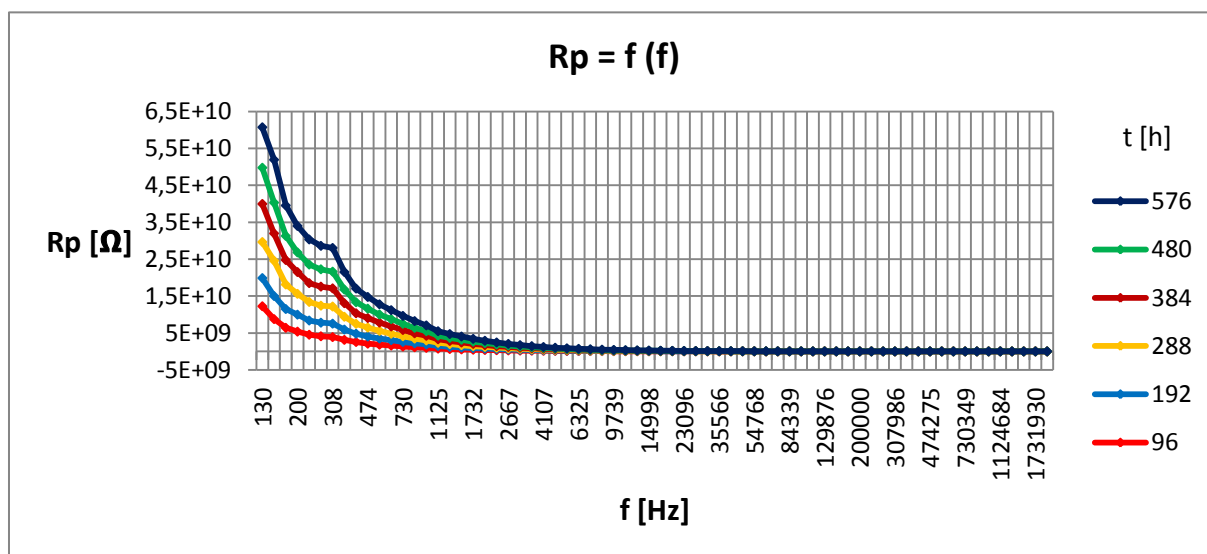
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=72 h (oranžová) t=96 h (tmavě červená) t=120 h (zelená) t=144 h (tmavě modrá)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=96 h (červená) t=192 h (modrá) t=288 h (oranžová) t=384 h (tmavě červená) t=480 h (zelená) t=576 h (tmavě modrá)



## **Celkové vyhodnocení paralelního odporu dielektrických materiálů**

Toto vyhodnocení se uskutečnilo u všech grafů včetně grafů v přílohách 1-12. V jednotlivých grafech pro všechny teploty stárnutí a všechny dielektrické materiály platí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i jejich paralelní odpor. V jednotlivých grafech se vypočetl průměr vrcholových hodnot paralelního odporu v různých časech expozice. Tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

Paralelní odpor u dielektrických materiálů C se s tepelným stárnutím 170 °C, 175 °C, 180 °C neustále mírně snižuje. U dielektrických materiálů C s tepelným stárnutím při teplotě 186 °C se paralelní odpor mírně zvýší. Paralelní odpor dielektrických materiálů C v dodaném stavu je o něco menší než u dielektrických materiálů C podrobených tepelnému stárnutí. U dielektrických materiálů D se velikost paralelního odporu s teplotou stárnutí mění a nelze určit trend růstu nebo poklesu. U tepelného stárnutí 178 °C dojde k zvýšení paralelního odporu oproti paralelnímu odporu při tepelném stárnutí 170 °C. U tepelného stárnutí 186 °C dojde k snížení paralelního odporu a u tepelného stárnutí 194 °C dojde opět k zvýšení paralelního odporu. Paralelní odpor dielektrických materiálů D v dodaném stavu je o trochu menší než u dielektrických materiálů D podrobených tepelnému stárnutí.

U dielektrických materiálů A se velikost paralelního odporu s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C a 190 °C neustále mírně snižuje. Paralelní odpor u dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 200 °C o něco opět vzroste. U dielektrických materiálů B paralelní odpor s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C klesá. Paralelní odpor dielektrických materiálů B v dodaném stavu je o něco menší než u dielektrických materiálů B podrobených tepelnému stárnutí. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti paralelního odporu od největší hodnoty po nejmenší je B, A, C, D.

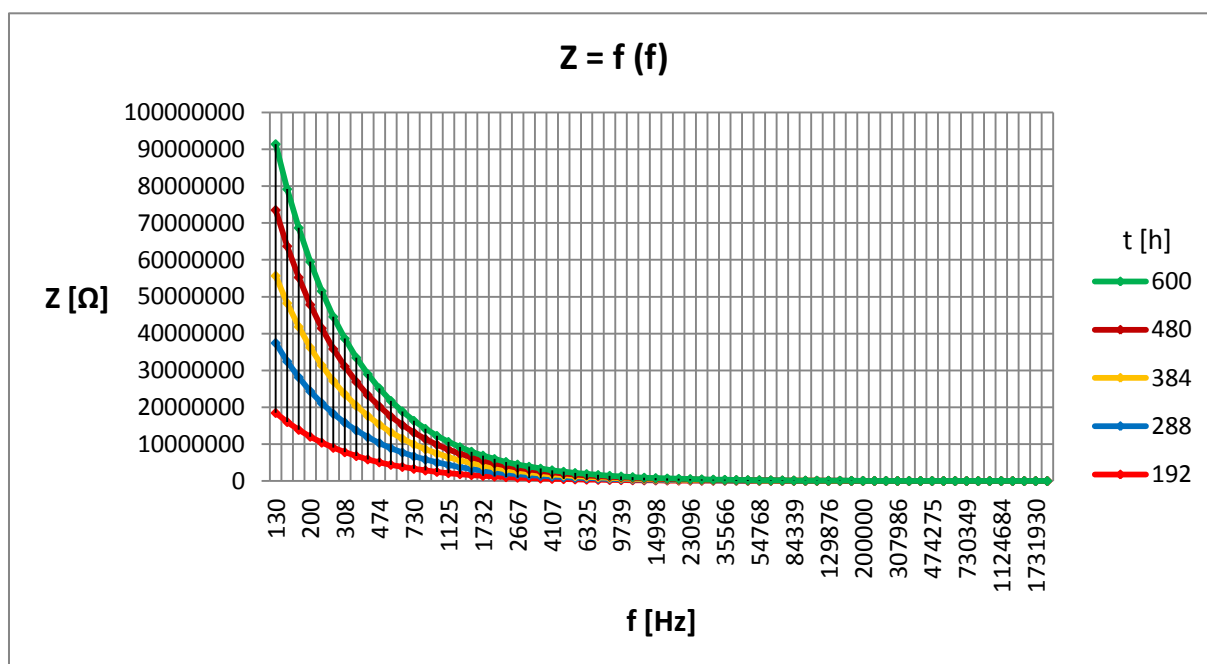
### **3.4.2.6 Vyhodnocení komplexní impedance**

Při vyhodnocování průběhů komplexní impedance dielektrických materiálů je důležitá maximální hodnota této veličiny. U všech měřených dielektrických materiálů s rostoucí frekvencí komplexní impedance podle předpokladů klesá.

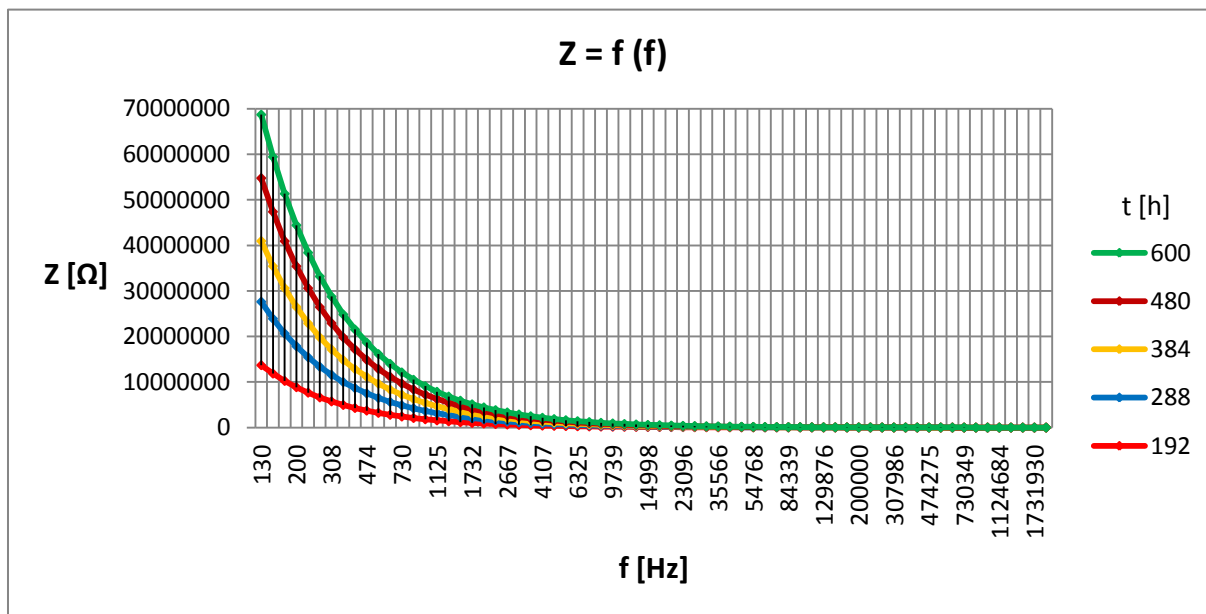
## Vyhodnocení komplexní impedance u dielektrických materiálů s teplotou stárnutí 170 °C

Ve všech grafech platí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i komplexní impedance. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti komplexní impedance od největší hodnoty po nejmenší je B, A, C, D. Toto pořadí bylo určeno tak, že se vypočetl průměr všech maximálních hodnot komplexní impedance v jednotlivých grafech a tyto hodnoty se pak mezi sebou porovnaly.

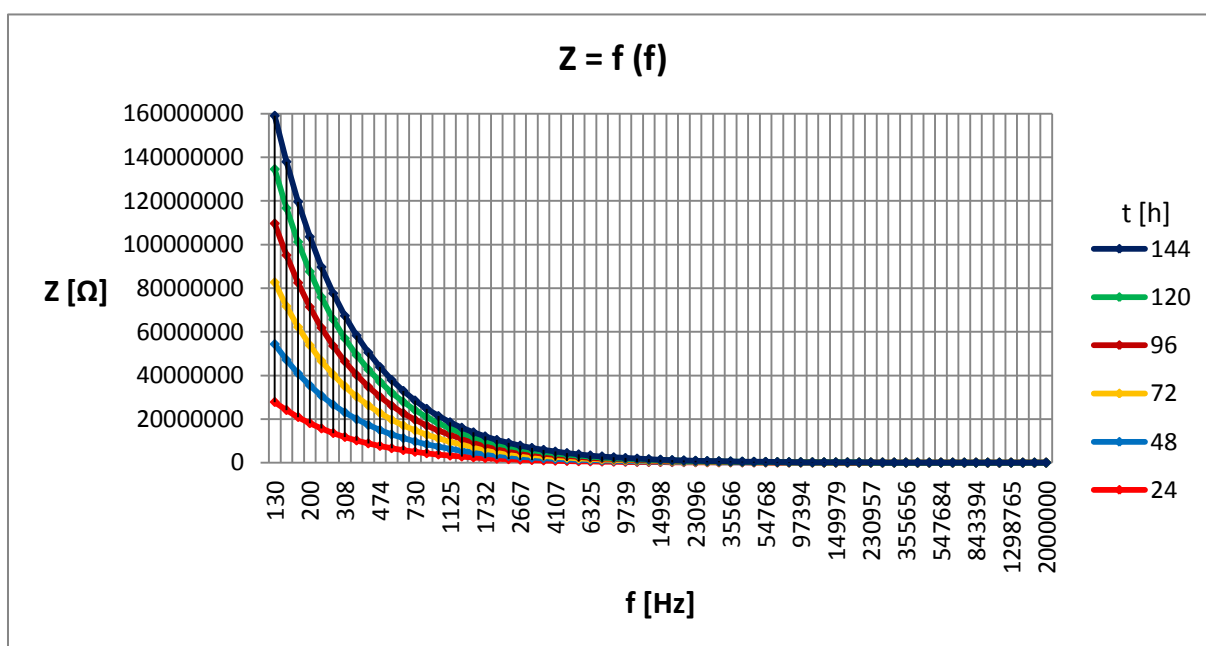
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



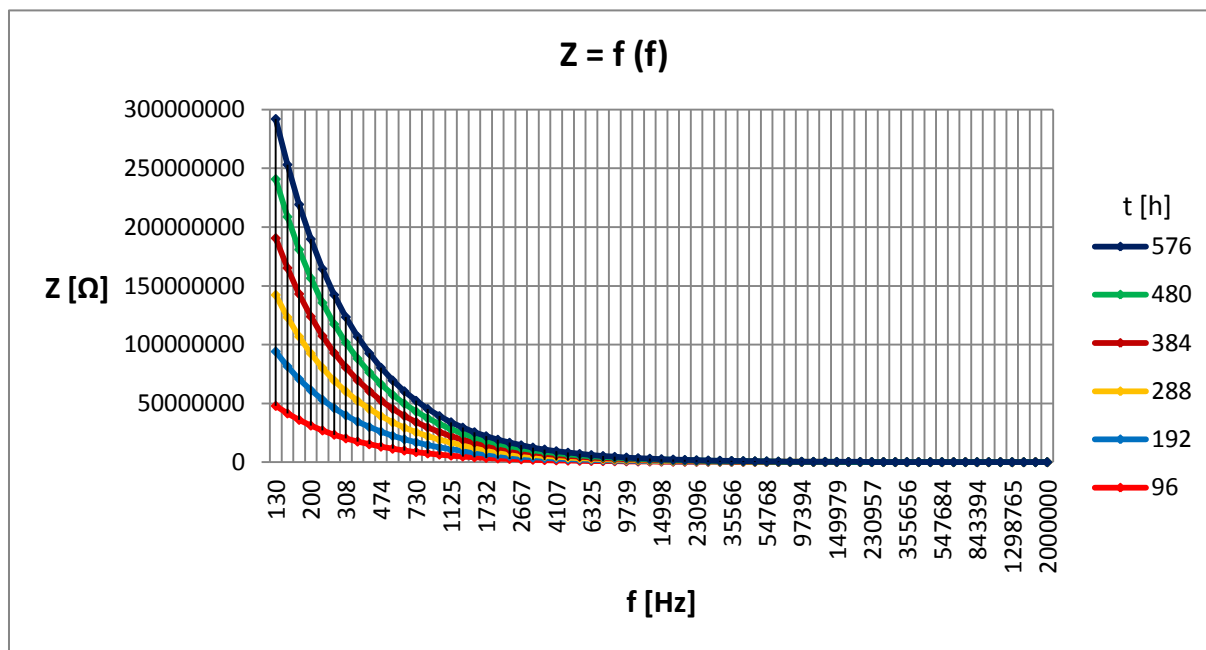
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=72 h (oranžová) t=96 h (tmavě červená) t=120 h (zelená) t=144 h (tmavě modrá)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=170\text{ °C}$	t=96 h (červená) t=192 h (modrá) t=288 h (oranžová) t=384 h (tmavě červená) t=480 h (zelená) t=576 h (tmavě modrá)



### Celkové vyhodnocení komplexní impedance dielektrických materiálů

Toto vyhodnocení se uskutečnilo u všech grafů včetně grafů v přílohách 1-12. V jednotlivých grafech pro všechny teploty stárnutí a všechny dielektrické materiály platí, že čím delší je čas expozice dielektrických materiálů, tím větší je i jejich komplexní impedance. V jednotlivých grafech se vypočítal průměr maximálních hodnot komplexní impedance v různých časech expozice a tyto hodnoty se následně mezi sebou porovnály.

U dielektrických materiálů C zůstává velikost impedance s tepelným stárnutím 170 °C a 175 °C zhruba na stejné úrovni. Velikost impedance dielektrických materiálů C s tepelným stárnutím 180 °C a 186 °C je také na stejné úrovni a oproti předchozím teplotám stárnutí se komplexní impedance zvýší. Komplexní impedance dielektrických materiálů C v dodaném stavu je menší než u dielektrických materiálů C podrobených tepelnému stárnutí. U dielektrických materiálů D zůstává velikost impedance s tepelným stárnutím 170 °C, 178 °C, 186 °C a 194 °C zhruba na stejné úrovni. Komplexní impedance dielektrických materiálů D v dodaném stavu je menší než u dielektrických materiálů D podrobených tepelnému stárnutí.

U dielektrických materiálů A zůstává velikost komplexní impedance s tepelným stárnutím 180 °C, 190 °C a 200 °C přibližně na stejné úrovni. Velikost komplexní impedance dielektrických materiálů A s tepelným stárnutím 170 °C je vyšší než při tepelném stárnutí 180 °C, 190 °C a 200 °C. U dielektrických materiálů B se velikost komplexní impedance s tepelným stárnutím 170 °C, 180 °C, 190 °C a 200 °C neustále snižuje. Komplexní impedance dielektrických materiálů B v dodaném stavu je menší než u dielektrických materiálů B podrobených tepelnému stárnutí. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti komplexní impedance od největší hodnoty po nejmenší je B, A, C, D.

### **3.4.2.7 Vyhodnocení dielektrických materiálů v dodaném stavu**

Porovnávaly se pouze dielektrické materiály B, C a D, protože dielektrické materiály A v dodaném stavu nebyly k dispozici. Vyhodnotil se rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou relativní permitivity a paralelní kapacity. Pořadí vyhodnocených dielektrických materiálů podle maximální velikosti naměřené relativní permitivity od největší hodnoty po nejmenší je B, D, C. Pořadí hodnocených dielektrických materiálů podle maximální velikosti naměřené paralelní kapacity od největší hodnoty po nejmenší je také B, D, C. Největší pokles relativní permitivity podle frekvence byl shledán u dielektrických materiálů B, nejmenší pak u dielektrických materiálů C. Největší pokles paralelní kapacity podle frekvence byl vypočítán u dielektrických materiálů B, nejmenší pak u dielektrických materiálů C.

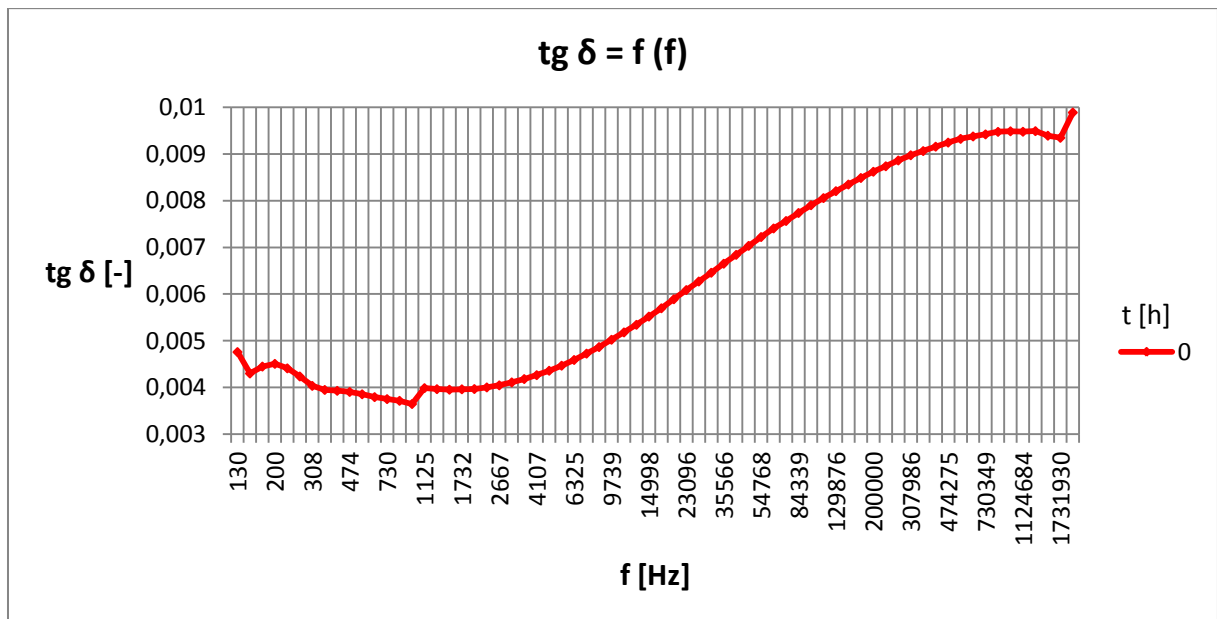
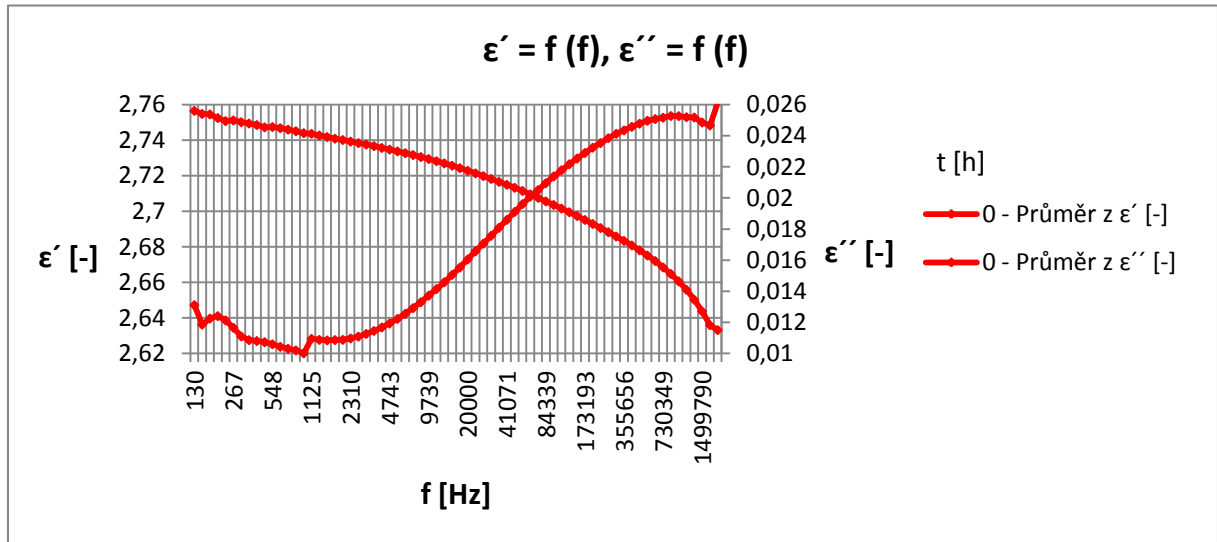
Ztrátové číslo a ztrátový činitel s rostoucí frekvencí nejprve stoupají a po dosažení určitého vrcholu klesají. Pořadí dielektrických materiálů podle velikosti frekvence, při které ztrátové číslo a ztrátový činitel dosáhnou vrcholu, je od největší hodnoty po nejmenší pořadí B, C, D. Rovnocenné jsou B a C. Mezi dielektrickými materiály v dodaném stavu a dielektrickými materiály podrobených tepelnému stárnutí je hodnota této frekvence téměř stejná. Rostoucí teplota stárnutí má u všech měřených dielektrických materiálů na velikost frekvence minimální vliv.

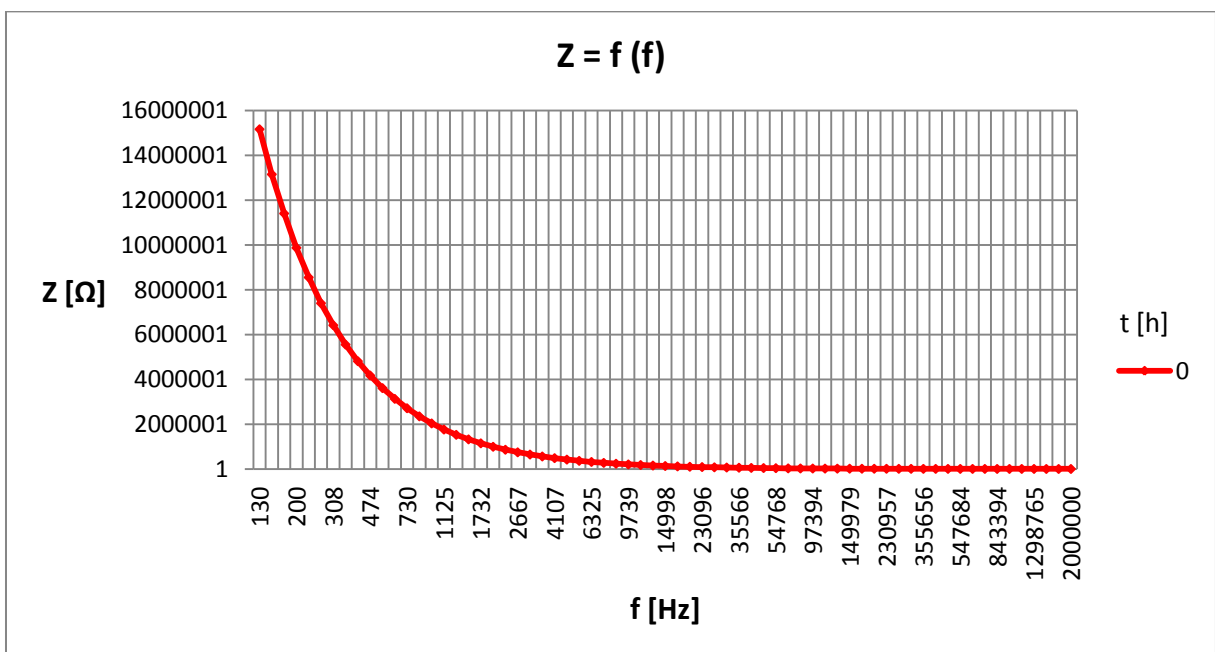
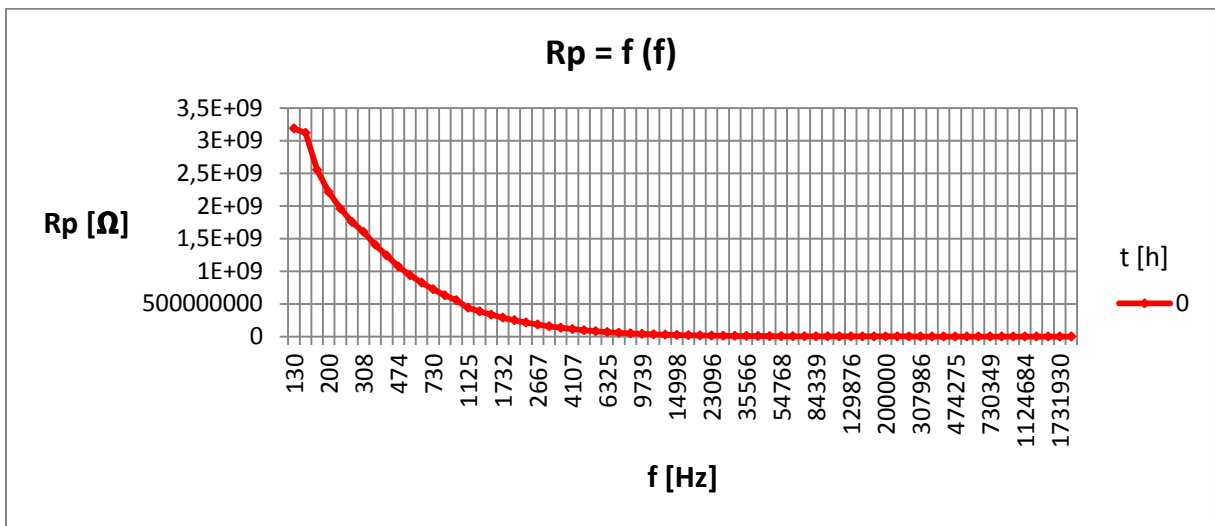
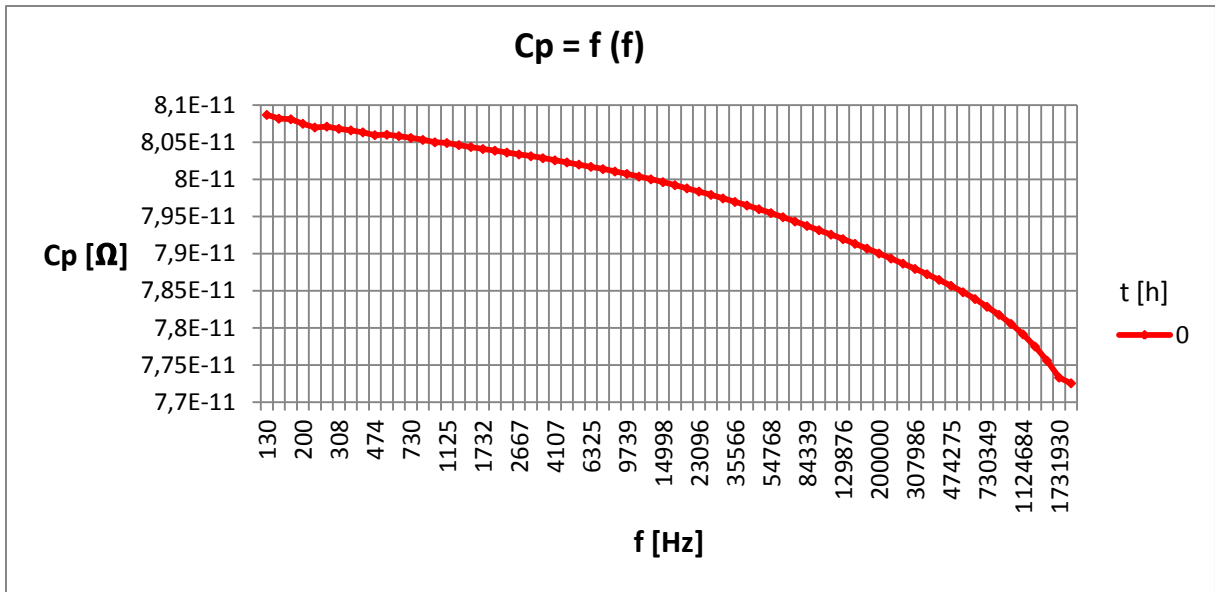
Dále se porovnávaly maximální hodnoty ztrátového čísla, ztrátového činitele, paralelního odporu a komplexní impedance. Pořadí hodnocených dielektrických materiálů podle maximální velikosti ztrátového čísla od největší hodnoty po nejmenší je B, D, C. Pořadí dielektrických materiálů podle maximální velikosti ztrátového činitele od největší hodnoty po nejmenší je B, D, C. Pořadí dielektrických materiálů podle maximální velikosti paralelního



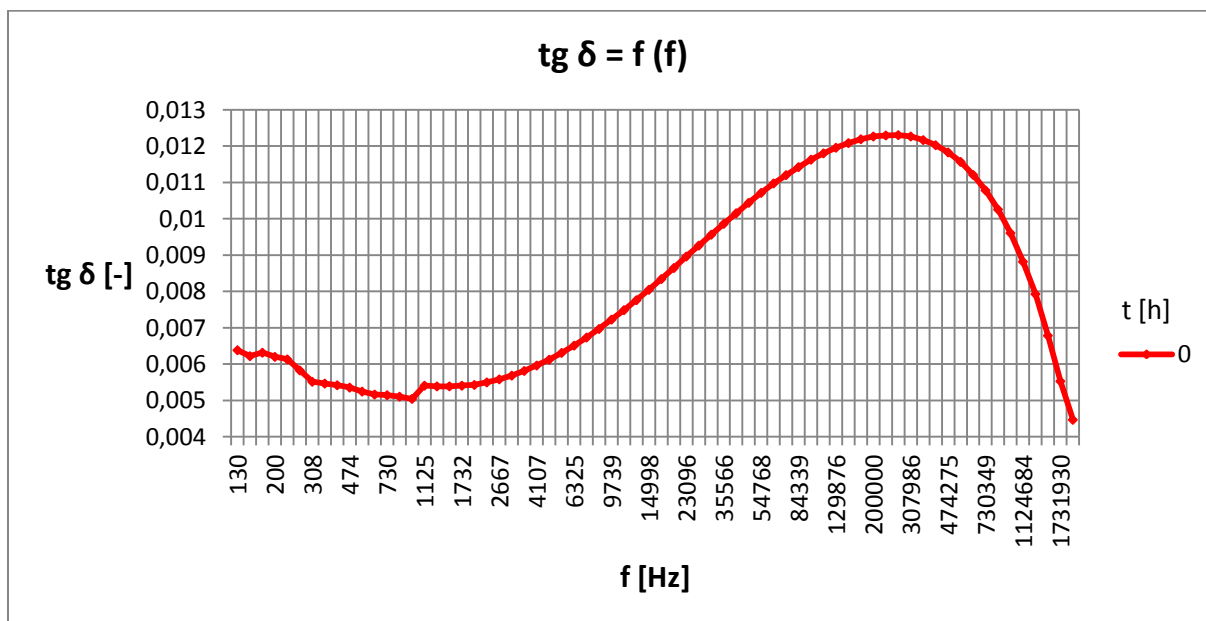
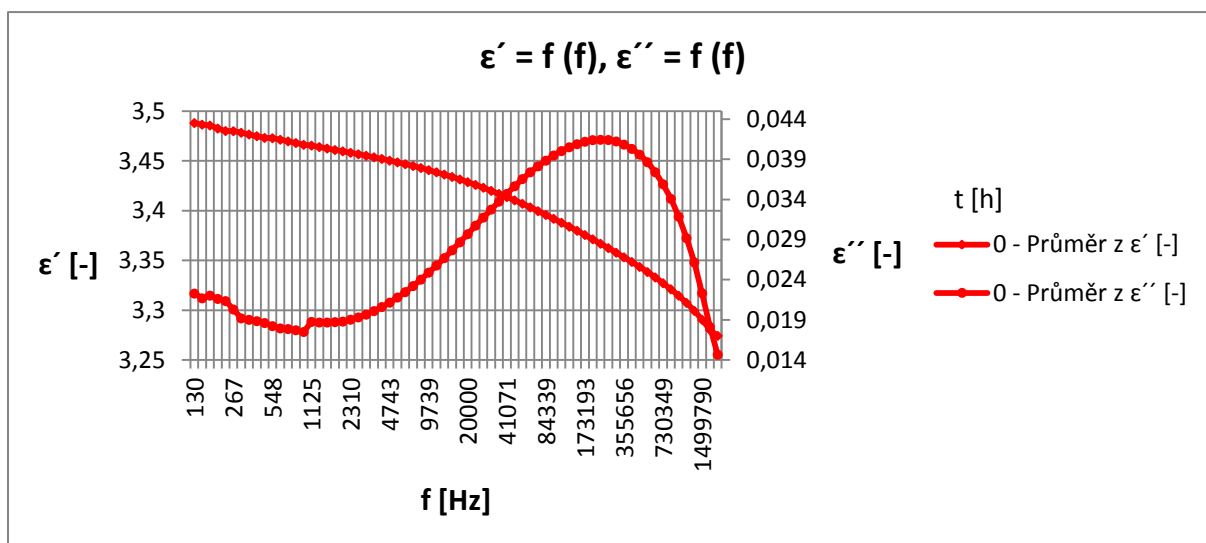
odporu od největší hodnoty po nejmenší je B, C, D. Pořadí dielektrických materiálů podle maximální velikosti komplexní impedance od největší hodnoty po nejmenší je B, D, C.

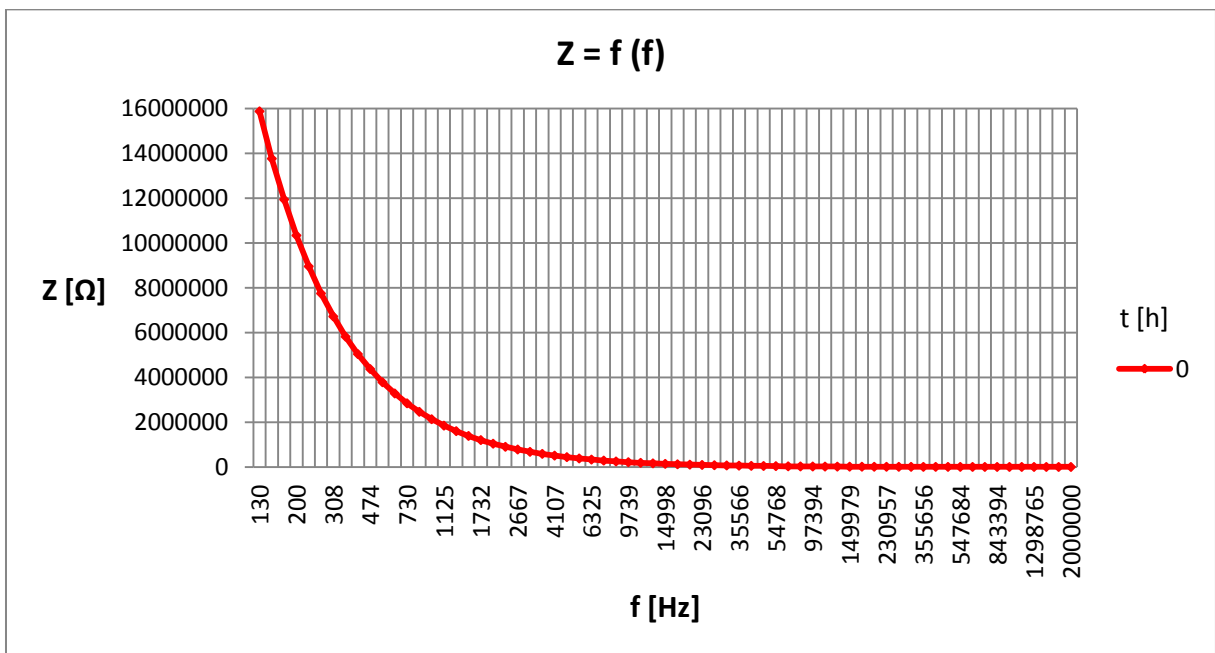
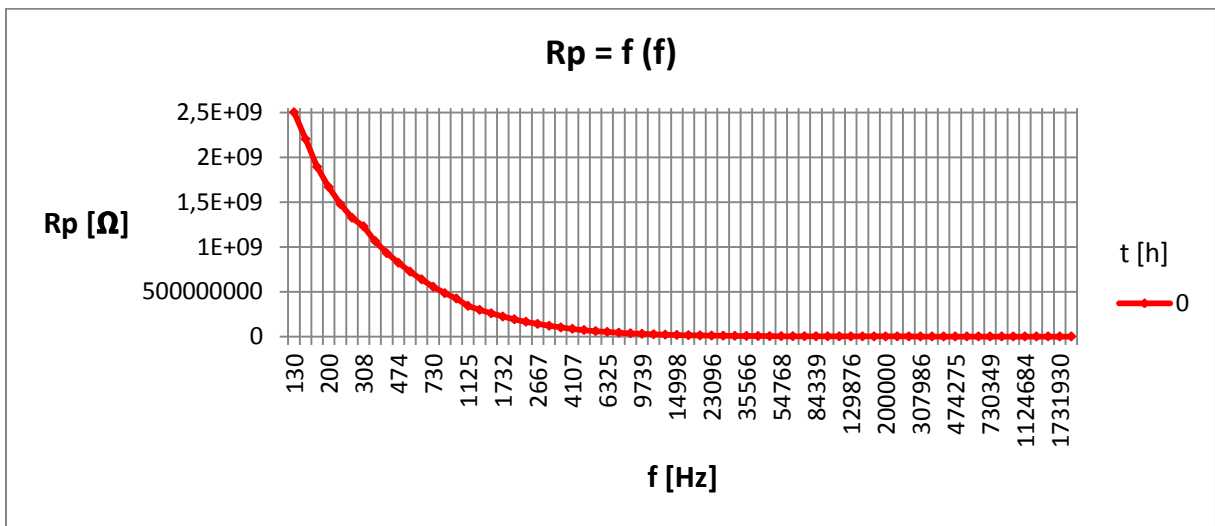
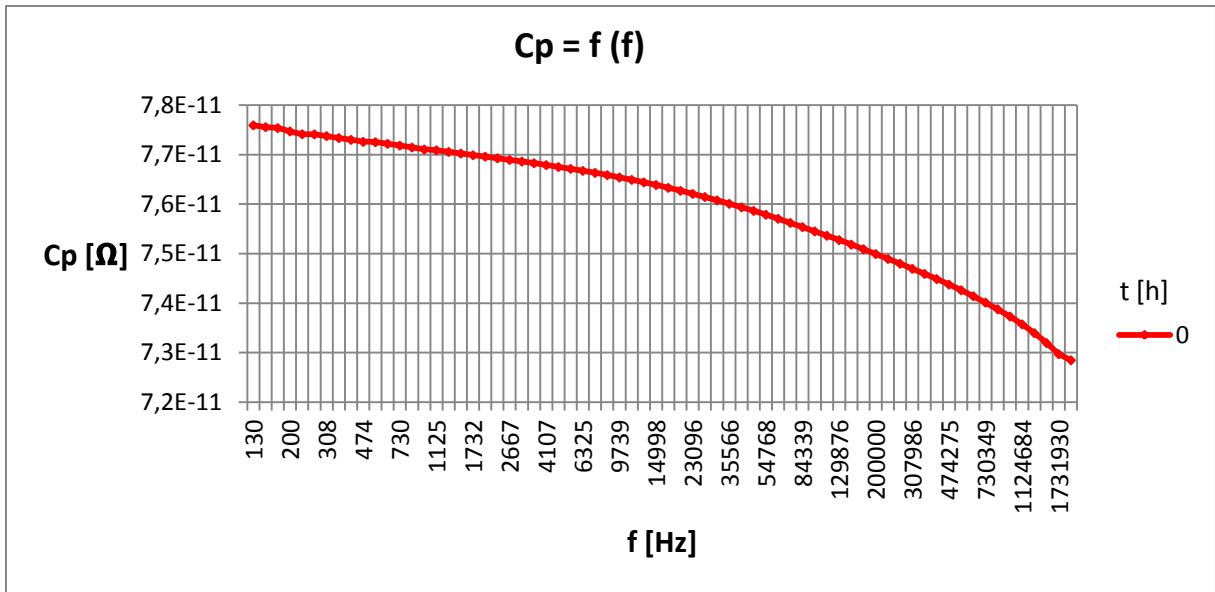
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	θ=20 °C (dodaný stav)	t=0 h (červená)



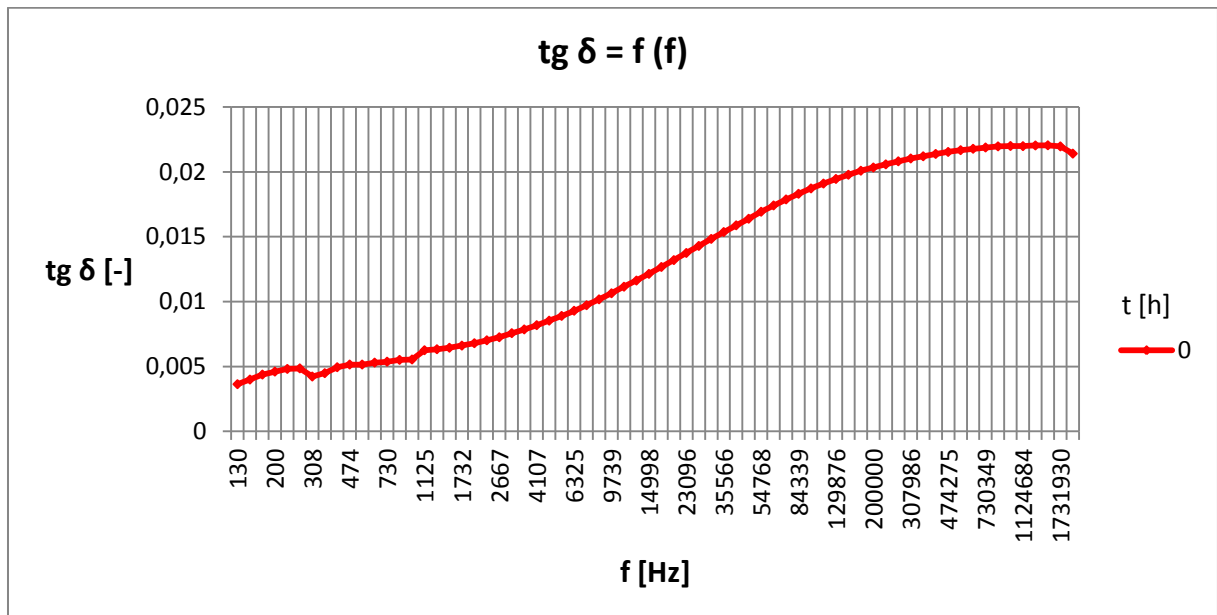
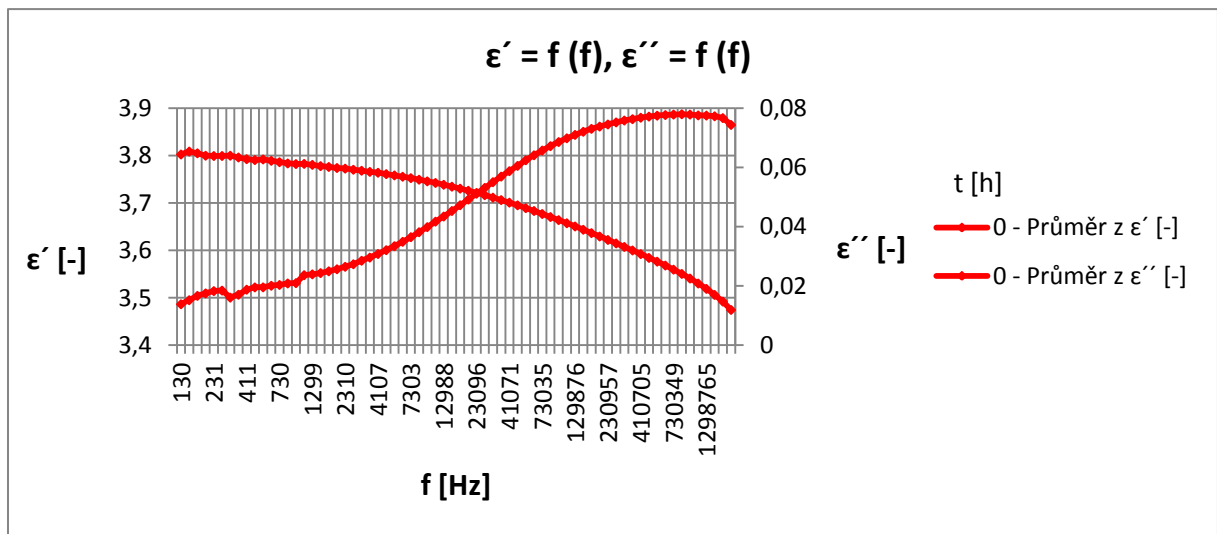


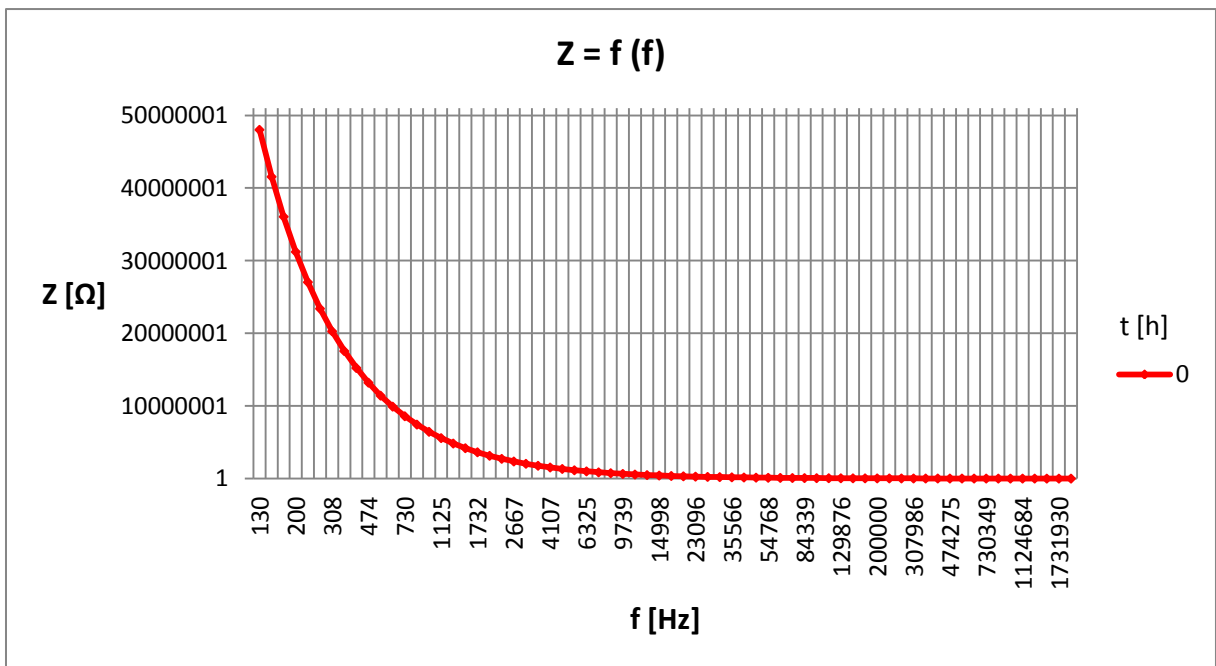
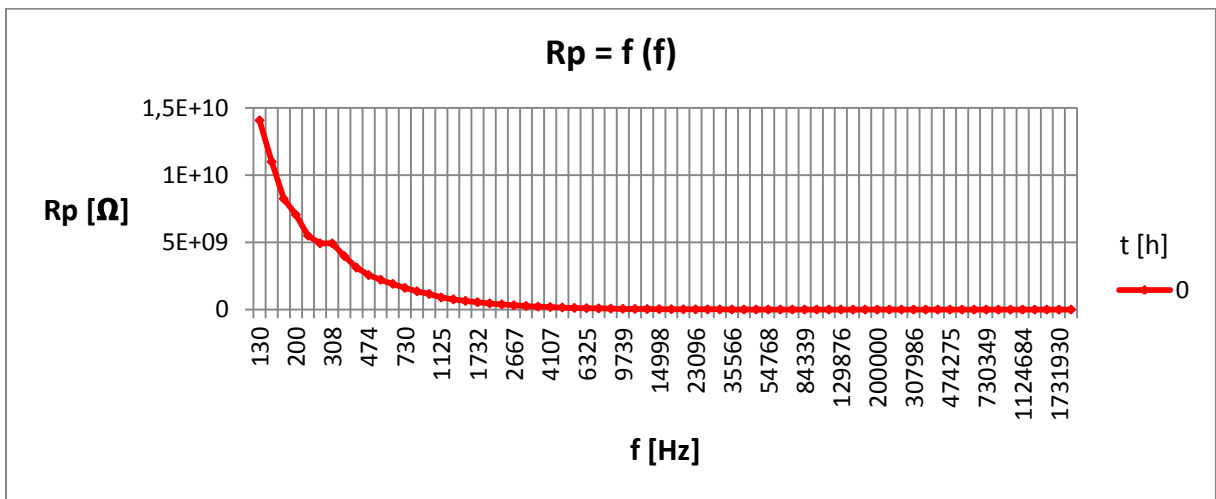
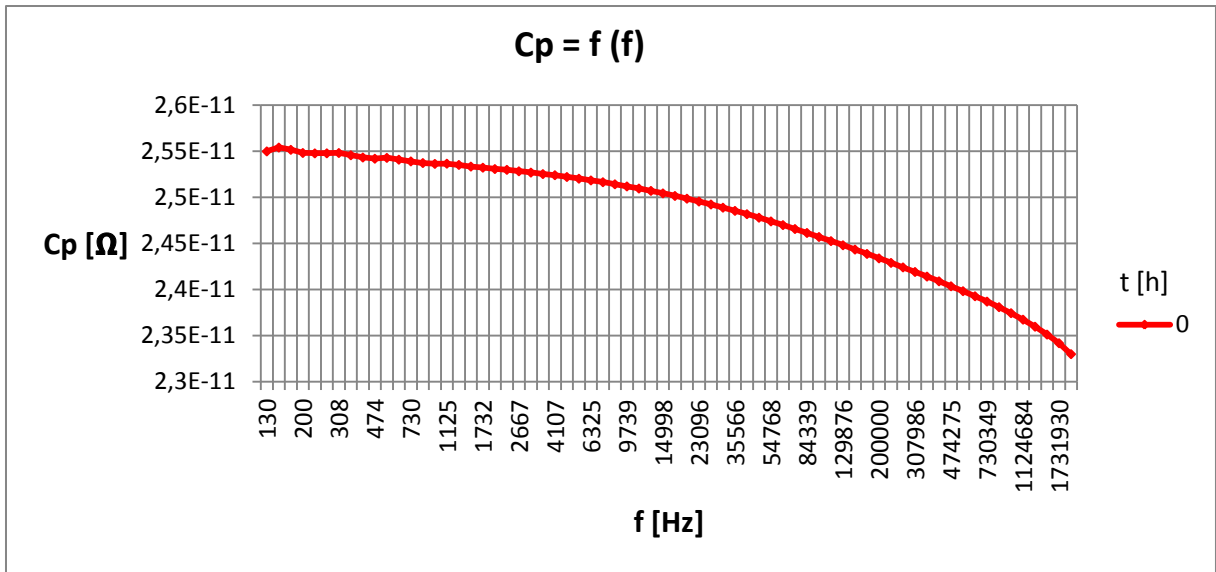
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=20$ °C (dodaný stav)	t=0 h (červená)





Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ (dodaný stav)	t=0 h (červená)





### 3.4.3 Druhý typ vyhodnocovaných grafů

Tyto grafy jsou závislostí  $\epsilon' = f(t)$ ,  $\epsilon'' = f(t)$ ,  $\text{tg } \delta = f(t)$ ,  $Z = f(t)$ ,  $C_p = f(t)$ ,  $R_p = f(t)$  a vyjadřují trend růstu nebo poklesu. V případě sledování lokálních trendů dielektrických vlastností (kapitola 3.4.3.2) je parametrem v těchto grafech několik frekvencí (843 Hz, 2000 Hz, 20000 Hz, 200000 Hz a 2000000 Hz) a jedna teplota stárnutí. Tento typ grafů je v přílohách 13 až 31. V případě sledování celkových trendů (kapitola 3.4.3.1) je zvolen jako parametr jedna frekvence (20000 Hz) a všechny teploty stárnutí platné pro konkrétní sledované dielektrické materiály. Malé  $t$  vyjadřuje čas expozice.

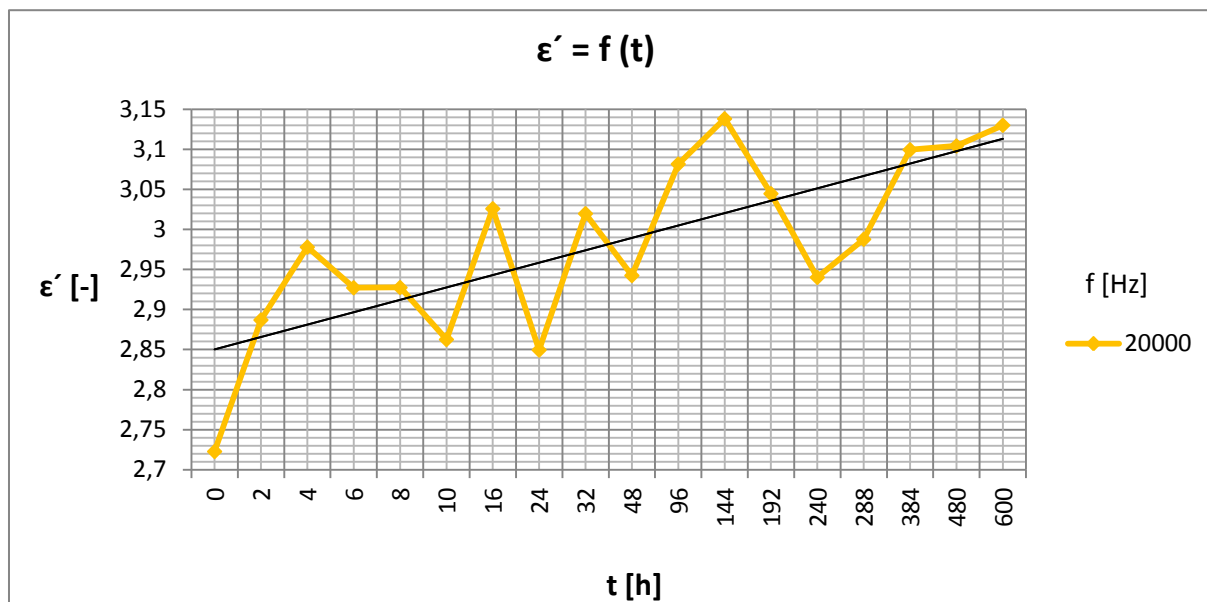
#### 3.4.3.1 Sledování celkových trendů dielektrických vlastností v závislosti na čase

Aby bylo možné dobře vyhodnocovat růst nebo pokles měřených dielektrických vlastností s ohledem na všechny časy expozice, je potřeba sledovat celkový trend růstu nebo poklesu. Tento celkový trend je získán tak, že do jednoho grafu se umístí jeden druh dielektrických materiálů a zkoumá se jedna jejich dielektrická vlastnost. Průběh vlastnosti daných materiálů zahrnuje všechny teploty stárnutí a všechny časy expozice těchto materiálů. Parametrem je jedna hodnota frekvence a všechny teploty stárnutí, které jsou platné pro dané dielektrické materiály. Grafy probíhají s různě velkými maximy a minimy v různých časech expozice, a proto se jsou zde umístěny spojnice trendu pro jednodušší vyhodnocení. Takto získané grafy se pak mezi sebou porovnávají.

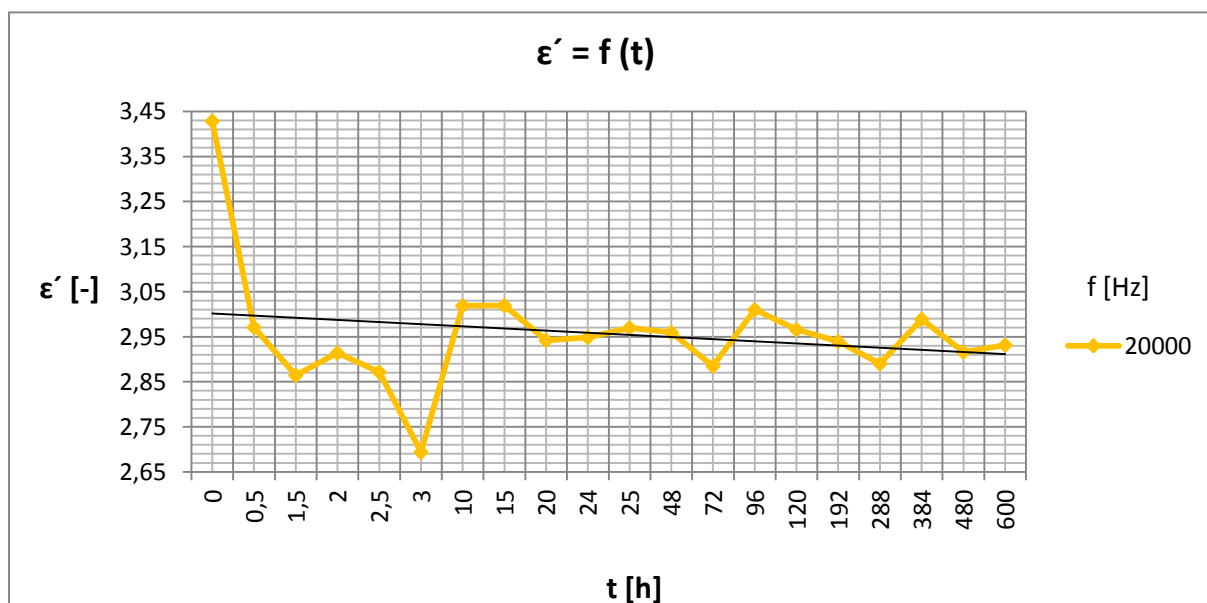
#### Vyhodnocení celkových trendů relativní permitivity v závislosti na časech expozice

Relativní permitivita dielektrických materiálů  $C$  s rostoucím časem expozice roste. Relativní permitivita dielektrických materiálů  $D$ ,  $A$ ,  $B$  s rostoucím časem expozice klesá.

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=175\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)

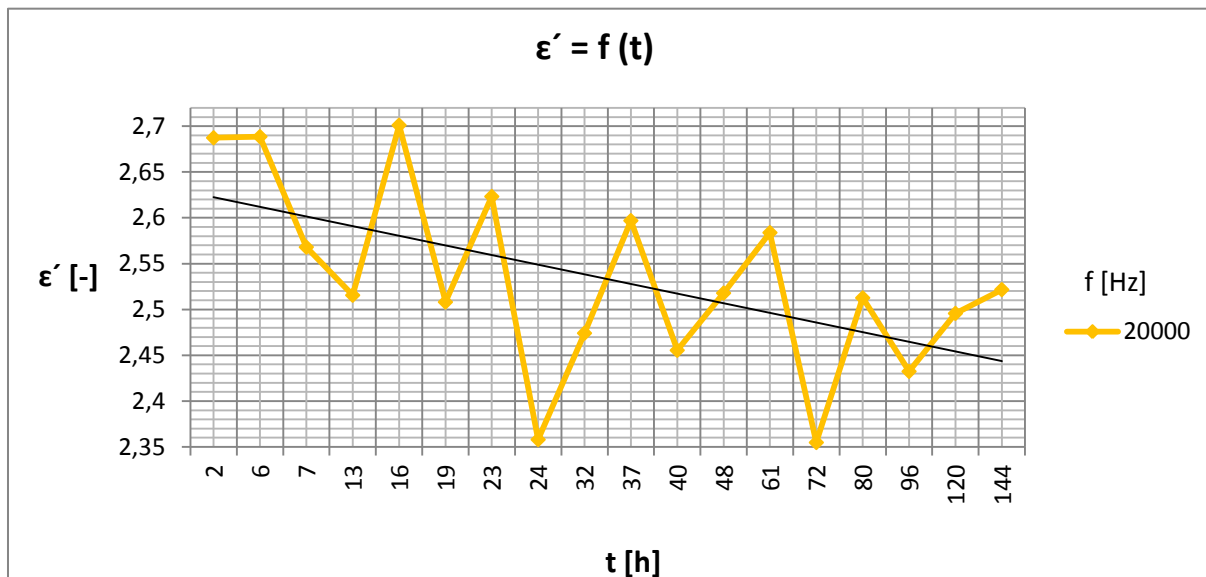


Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=178\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$ $\vartheta=194\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)

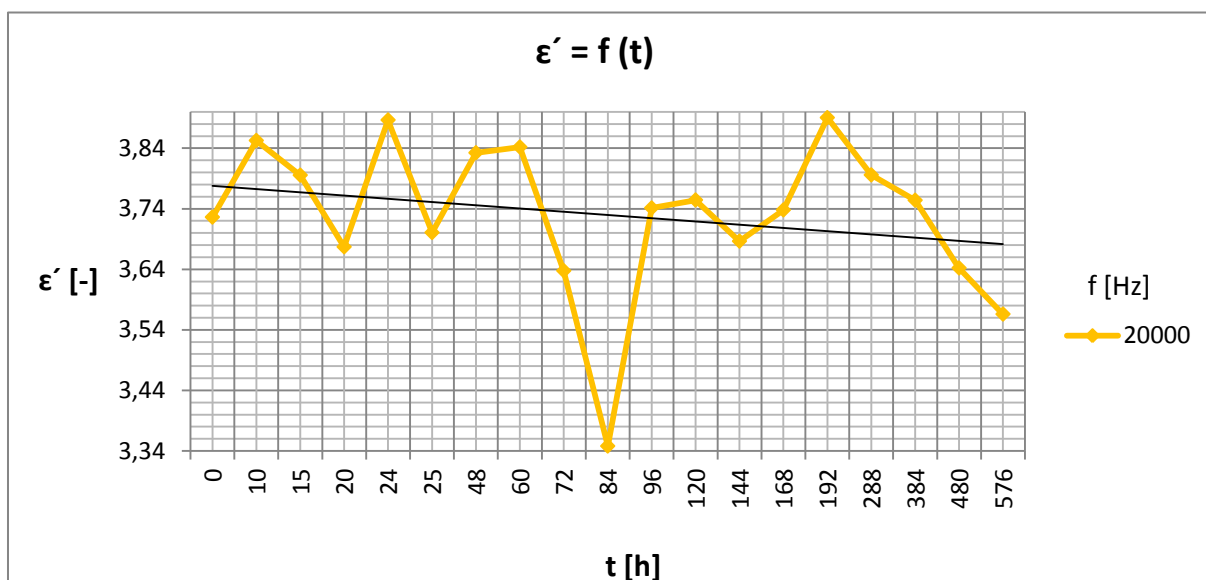




Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



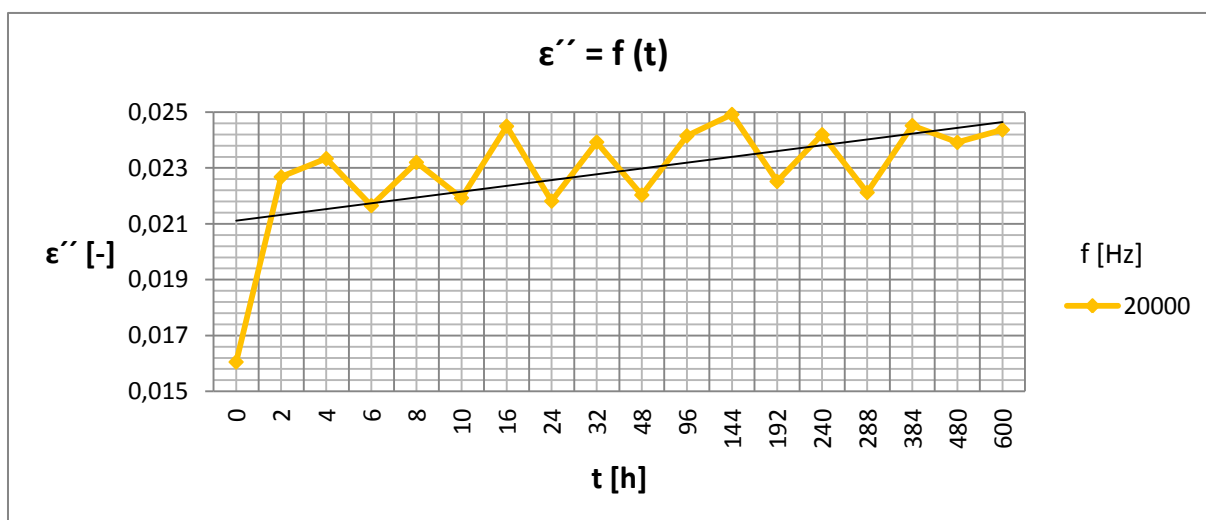
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



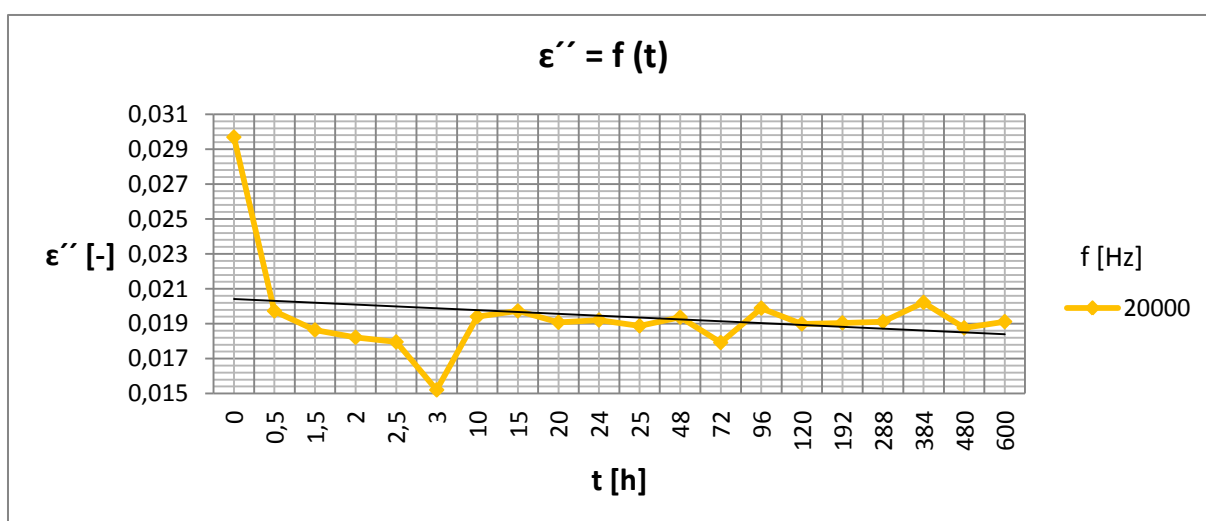
## Vyhodnocení celkových trendů ztrátového čísla v závislosti na časech expozice

Ztrátové číslo dielektrických materiálů C s rostoucím časem expozice roste. Ztrátové číslo dielektrických materiálů D, A, B s rostoucím časem expozice klesá.

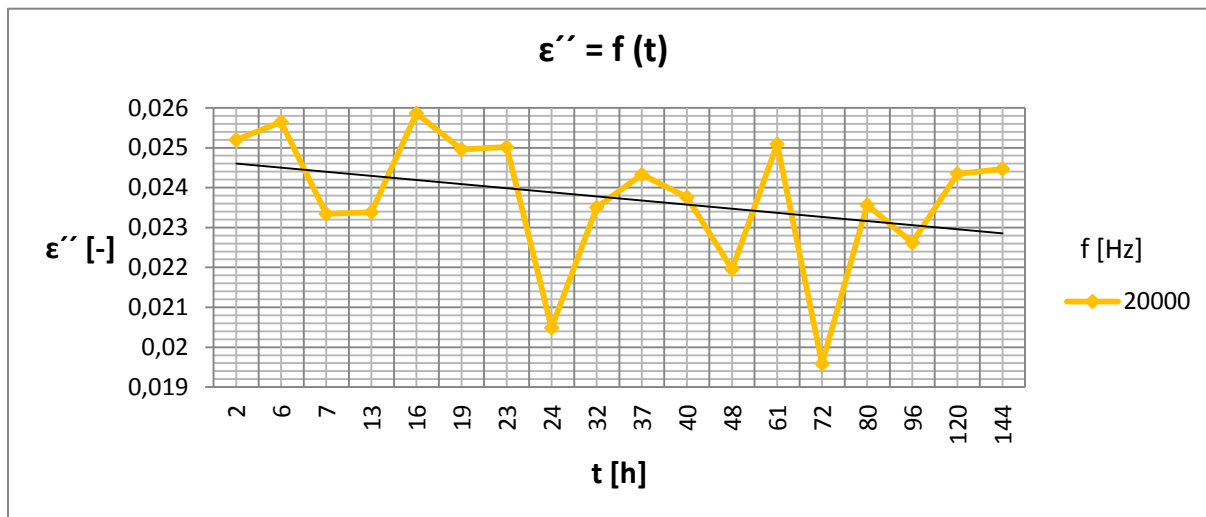
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=175\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



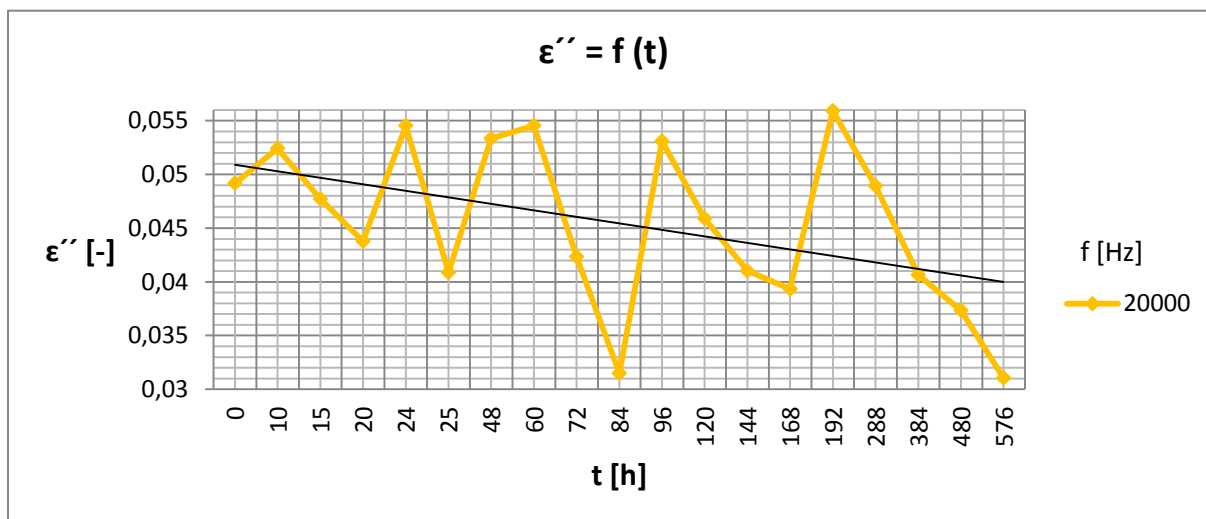
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=178\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$ $\vartheta=194\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



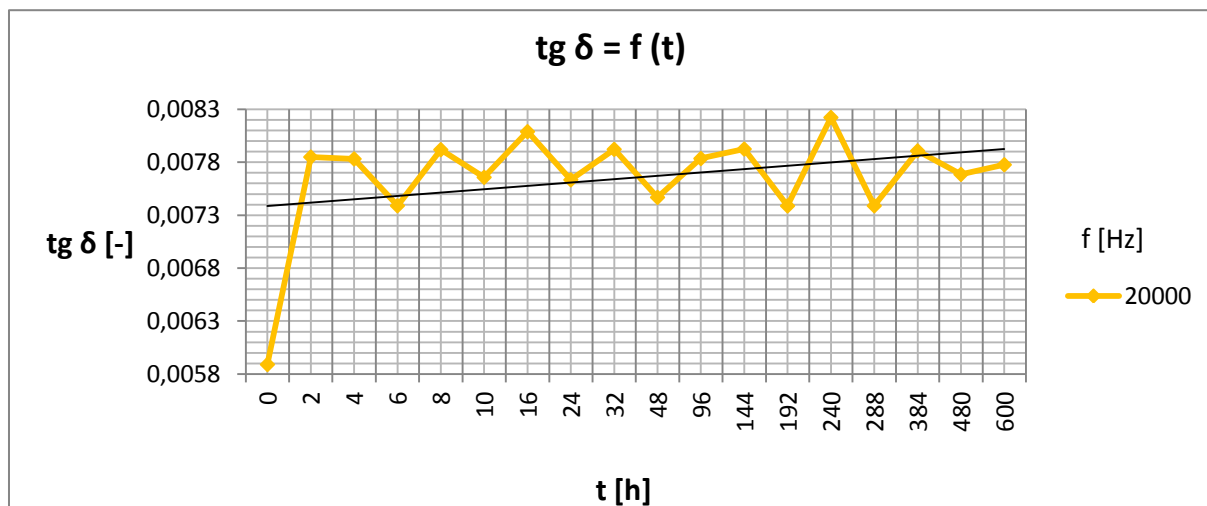
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



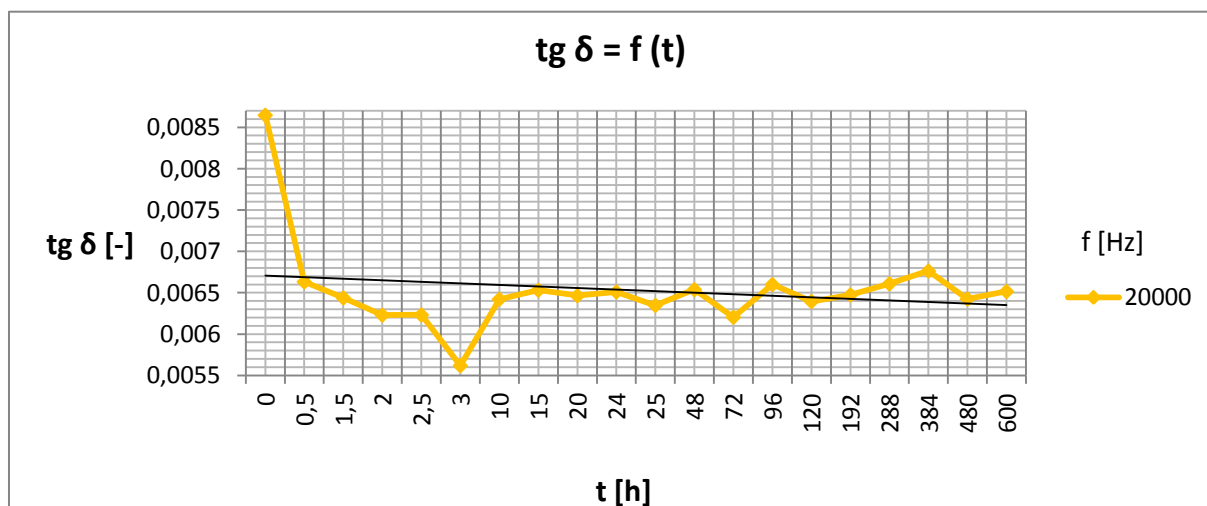
### Vyhodnocení celkových trendů ztrátového činitele v závislosti na časech expozice

Ztrátový činitel dielektrických materiálů C s rostoucím časem expozice roste. Ztrátový činitel dielektrických materiálů D, A, B s rostoucím časem expozice klesá.

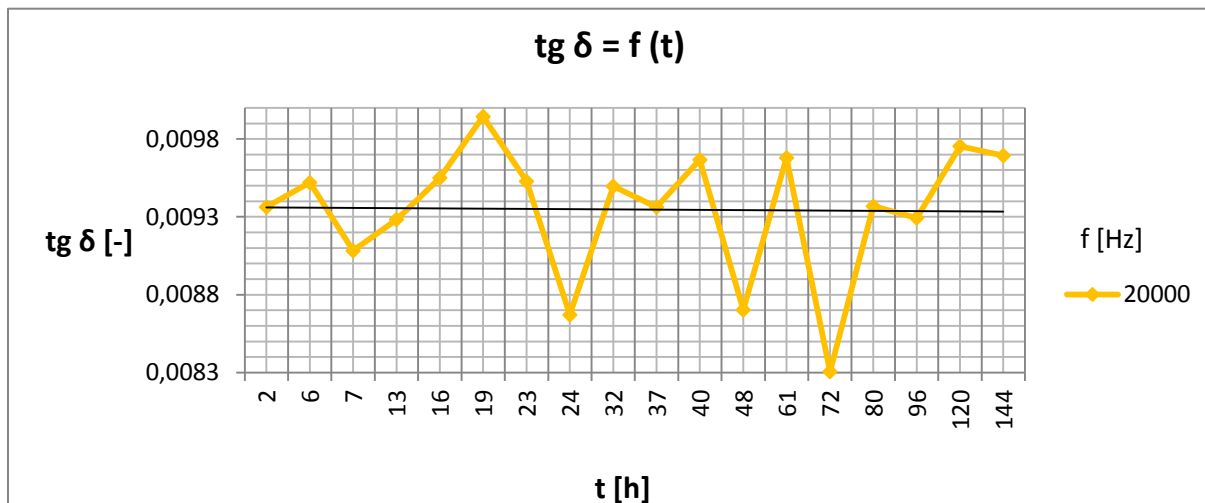
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=175\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



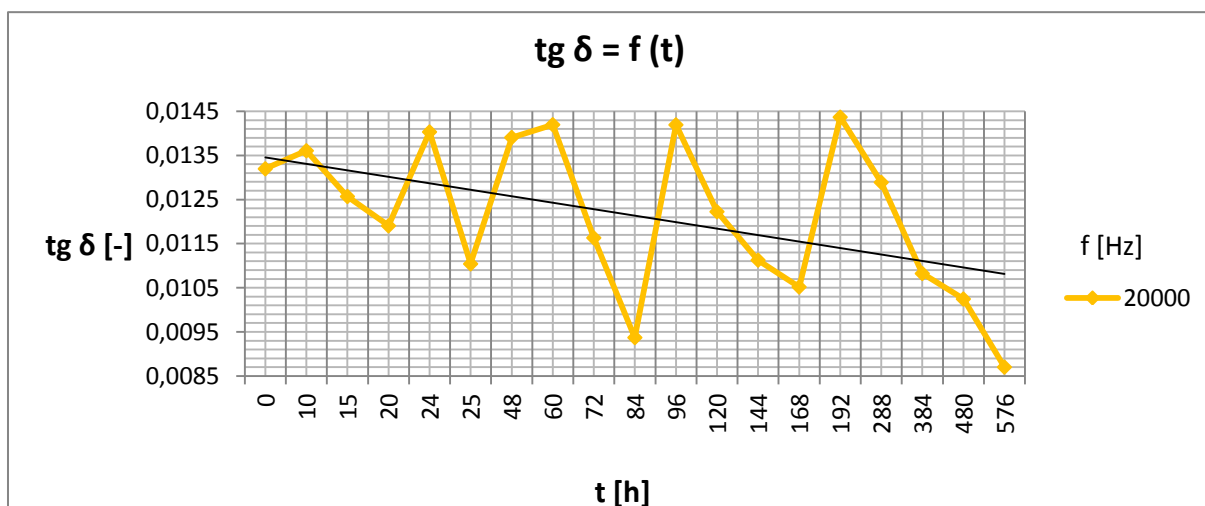
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=178\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$ $\vartheta=194\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



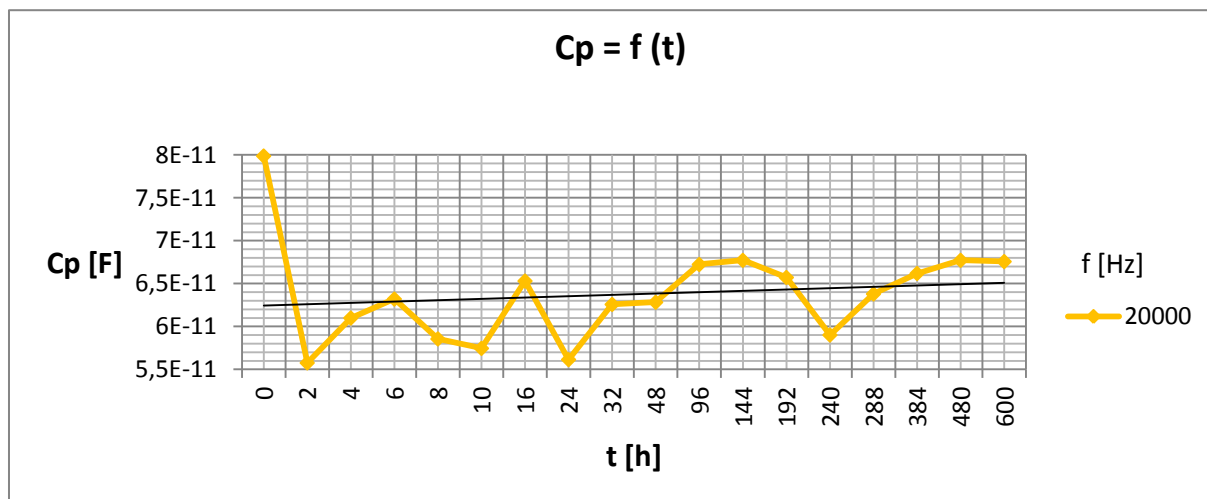
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



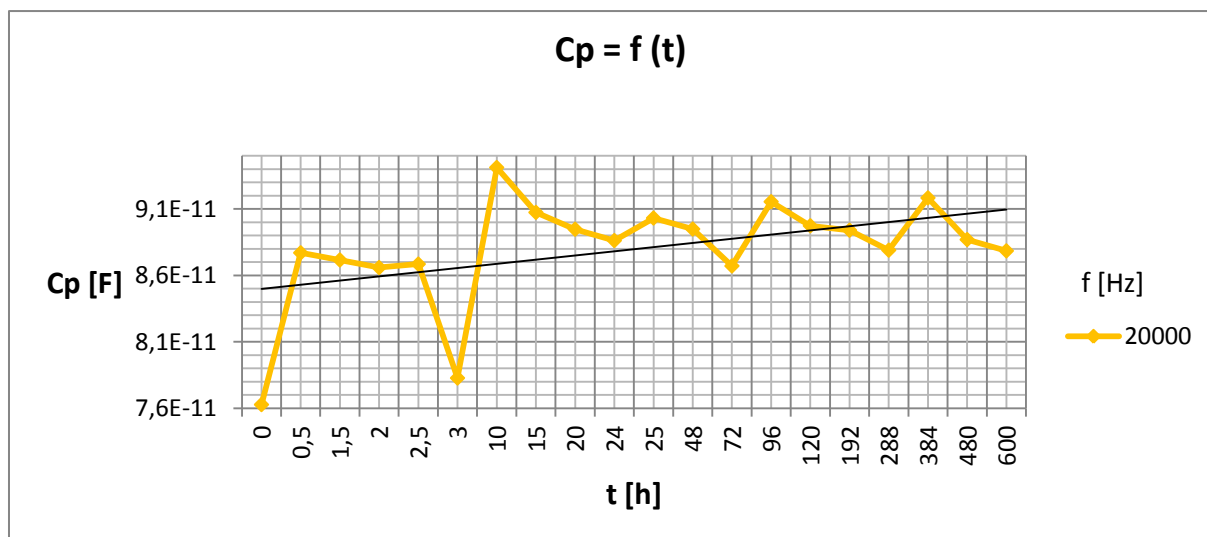
### Vyhodnocení celkových trendů paralelní kapacity v závislosti na časech expozice

Paralelní kapacita dielektrických materiálů C a D s rostoucím časem expozice roste.  
 Paralelní kapacita dielektrických materiálů A a B s rostoucím časem expozice klesá.

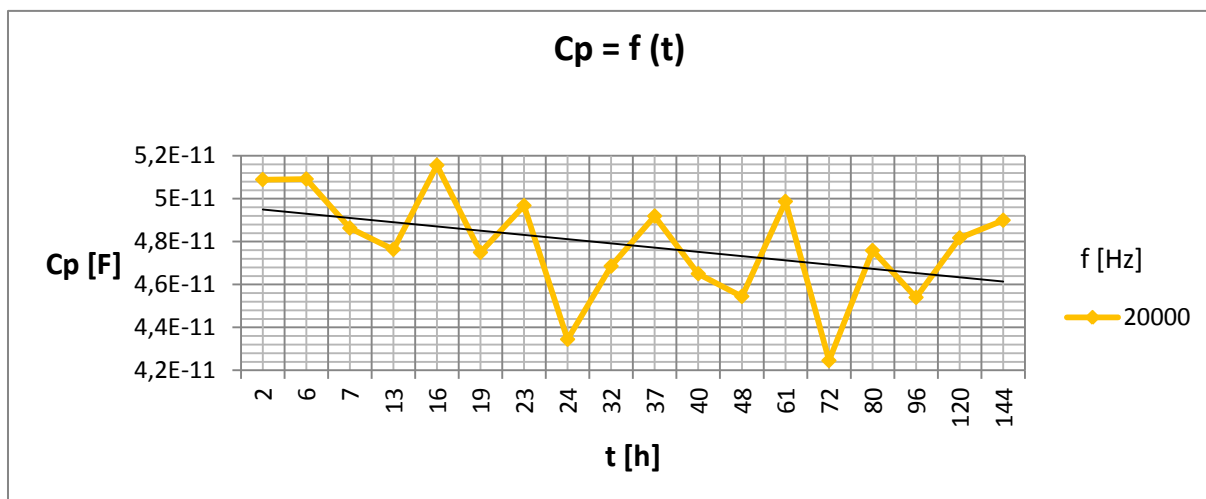
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=175\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



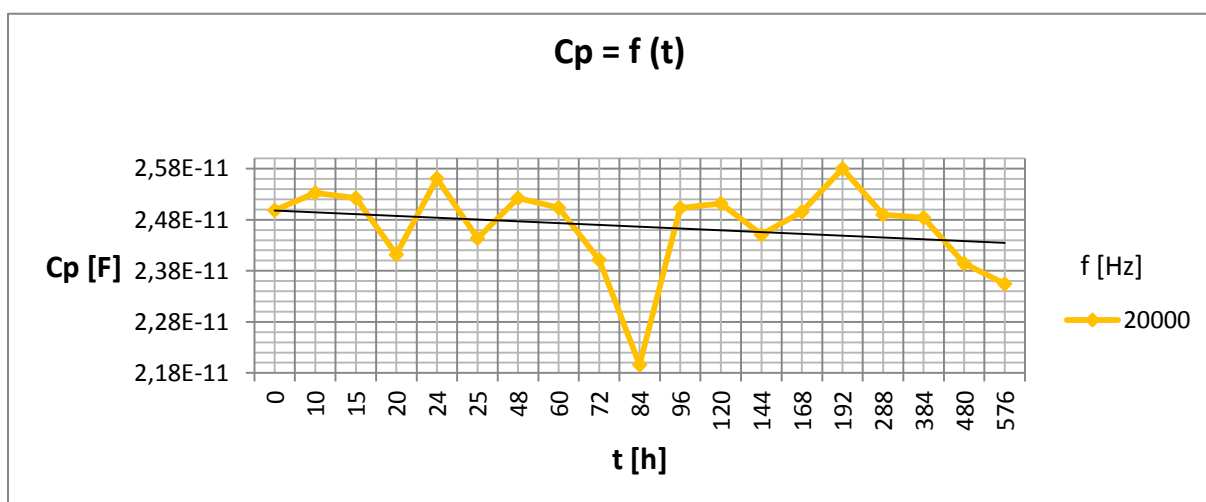
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=178\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$ $\vartheta=194\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



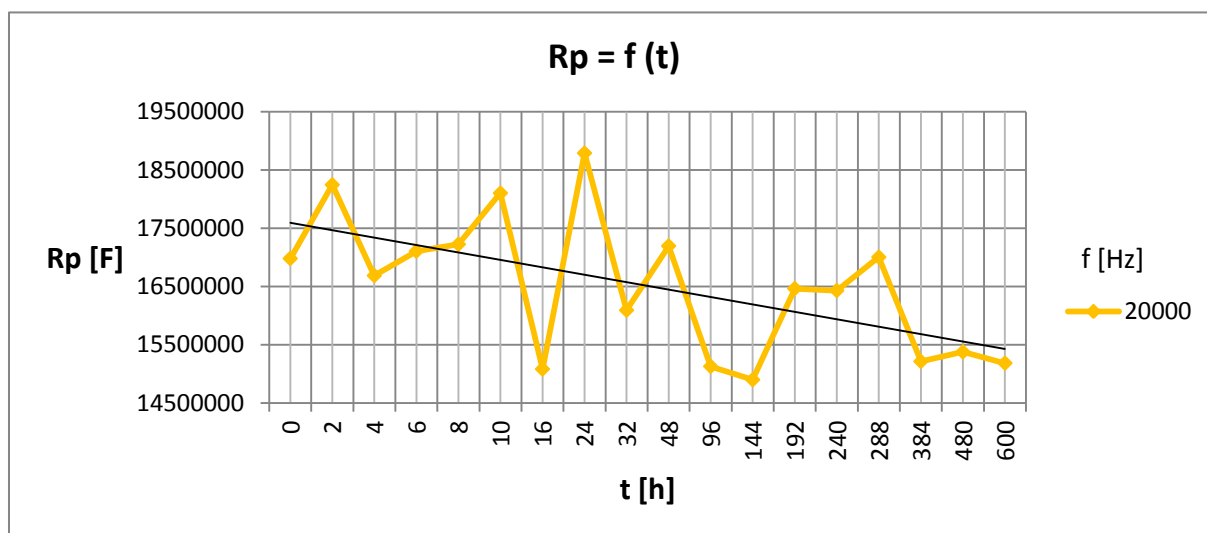
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



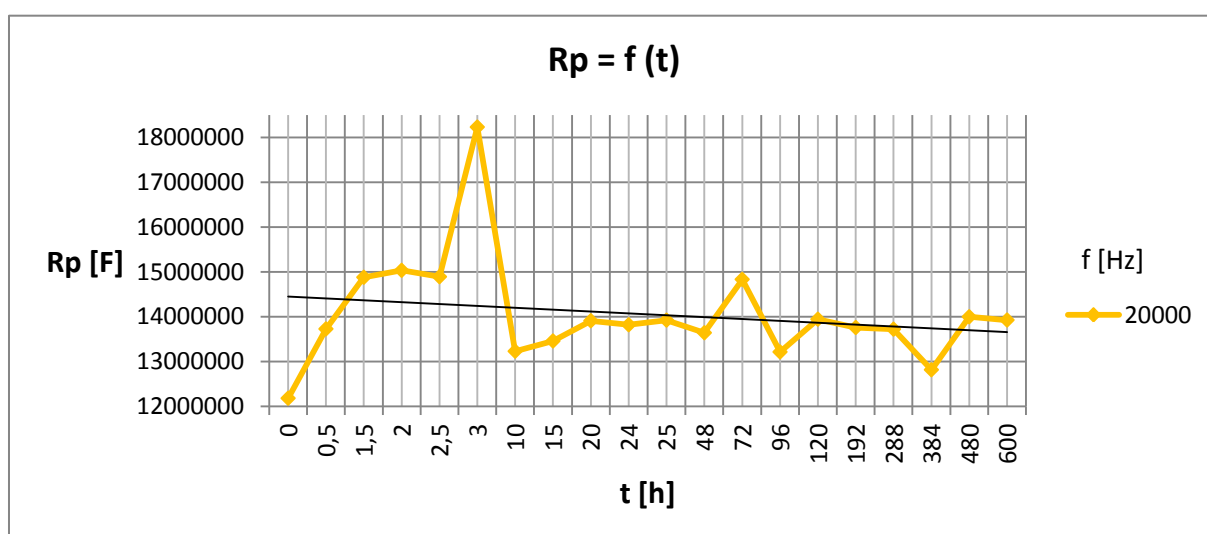
### Vyhodnocení celkových trendů paralelního odporu v závislosti na časech expozice

Paralelní odpor dielektrických materiálů C a D s rostoucím časem expozice klesá.  
 Paralelní odpor dielektrických materiálů A a B s rostoucím časem expozice roste.

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=175\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)

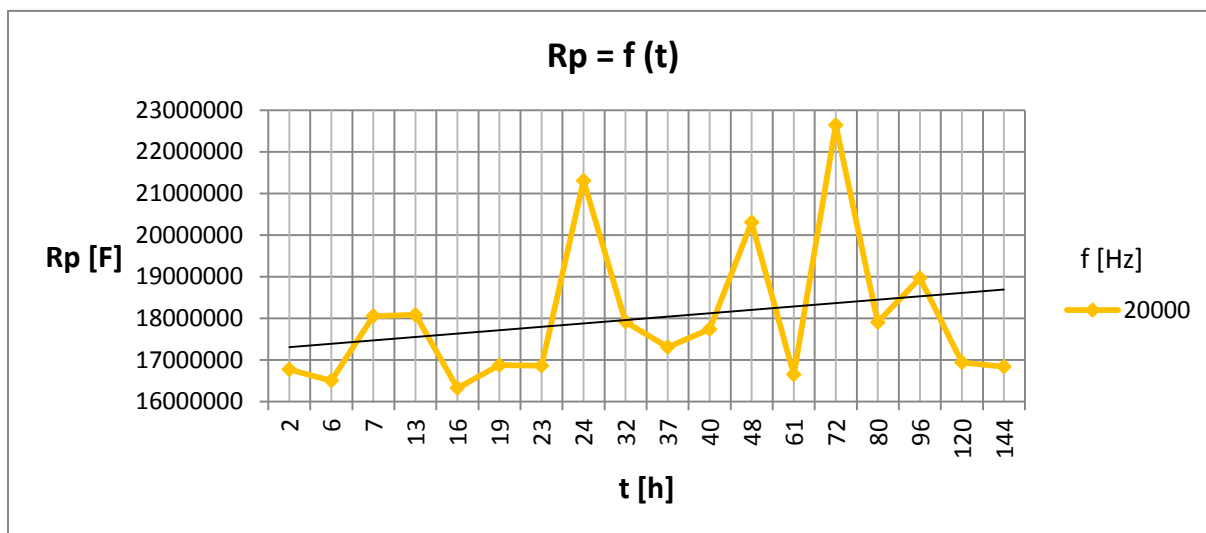


Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=178\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$ $\vartheta=194\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)

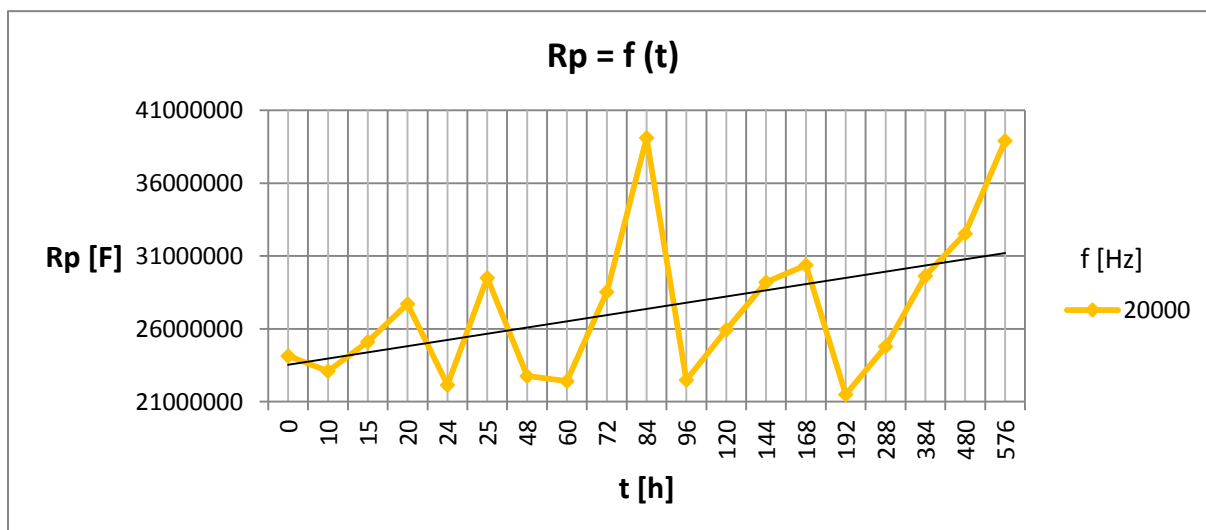




Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



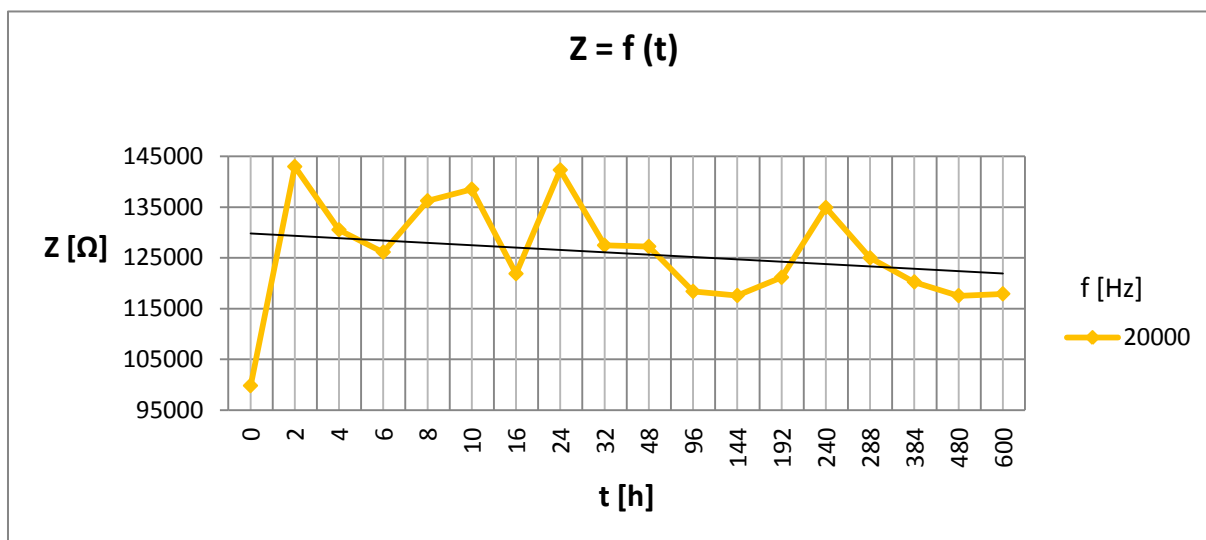
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



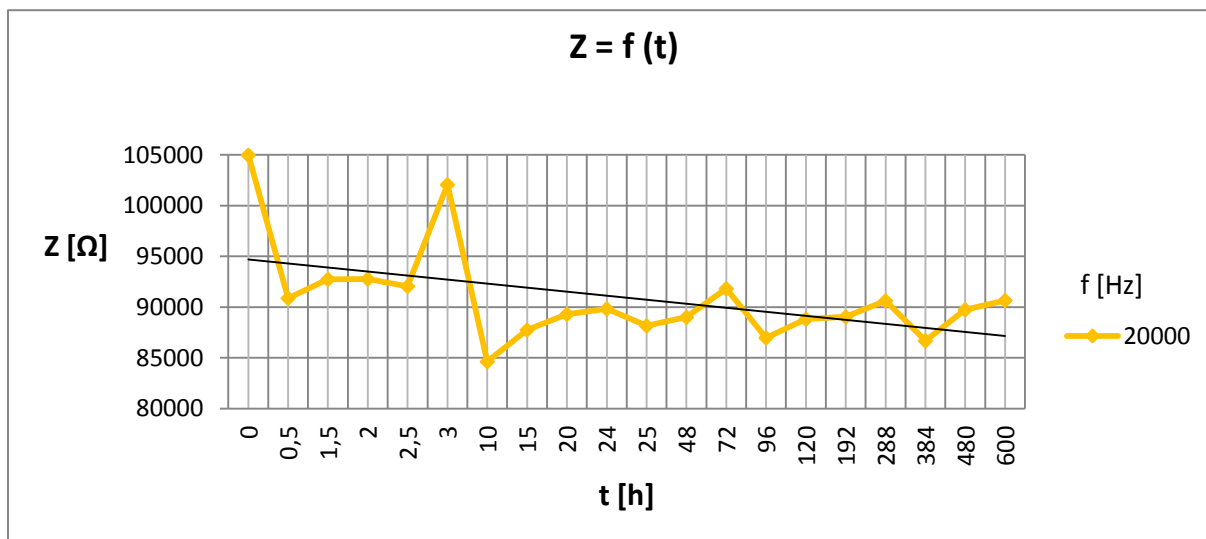
## Vyhodnocení celkových trendů komplexní impedance v závislosti na časech expozice

Komplexní impedance dielektrických materiálů C a D s rostoucím časem expozice klesá. Komplexní impedance dielektrických materiálů A a B s rostoucím časem expozice roste.

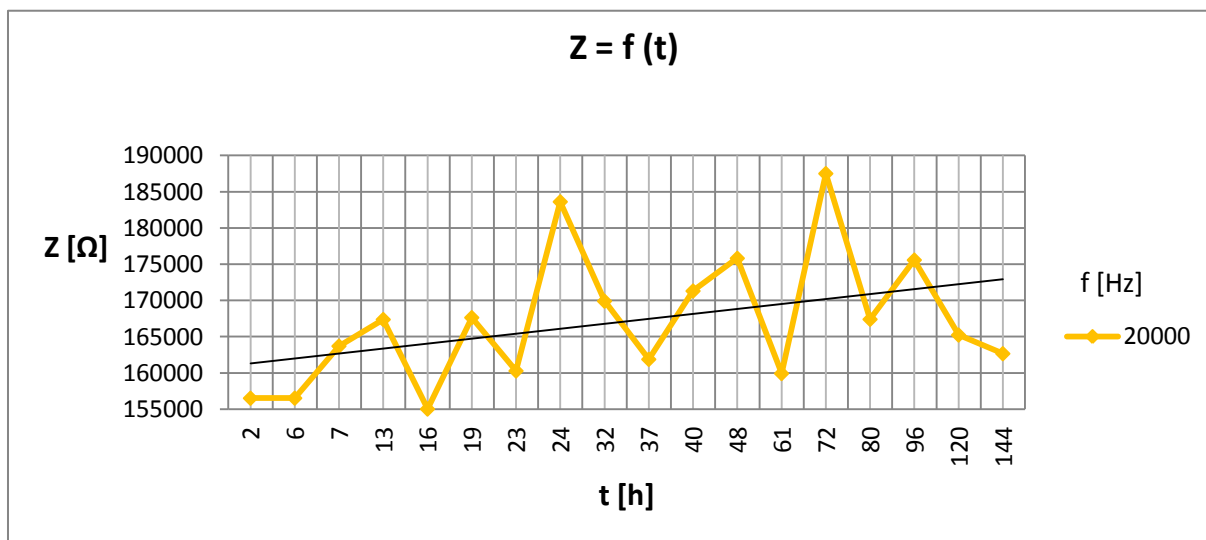
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=175\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



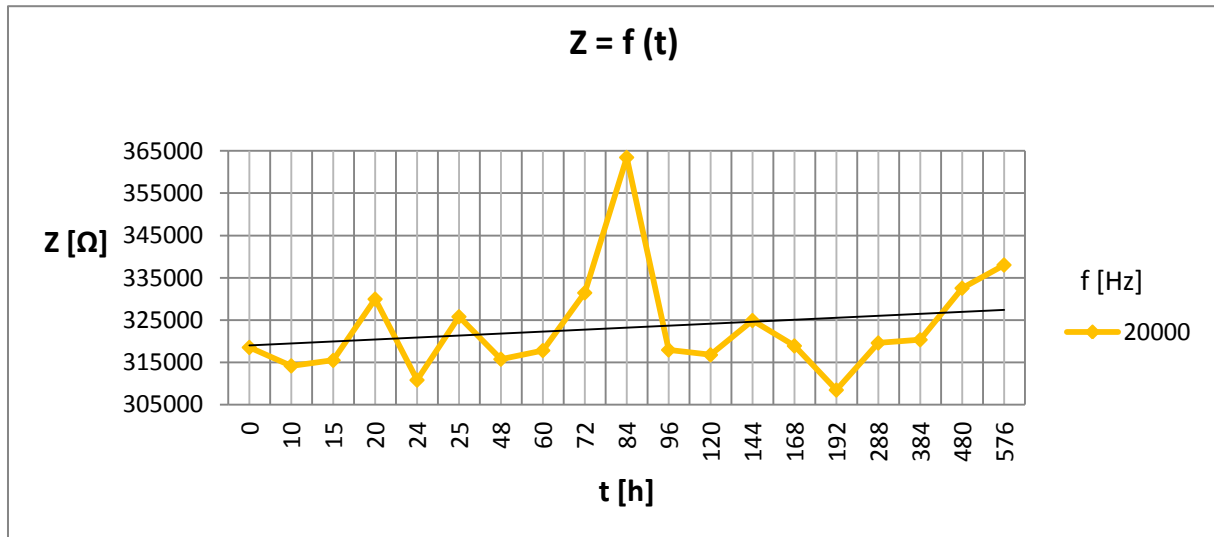
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=178\text{ °C}$ $\vartheta=186\text{ °C}$ $\vartheta=194\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=20\text{ °C}$ $\vartheta=170\text{ °C}$ $\vartheta=180\text{ °C}$ $\vartheta=190\text{ °C}$ $\vartheta=200\text{ °C}$	f = 20000 Hz (oranžová)



### 3.4.3.2 Sledování lokálních trendů dielektrických vlastností v závislosti na čase

Grafy probíhají s různě velkými maximy a minimy v různých časech expozice. Lokální trend poklesu průběhů relativní permitivity, ztrátového čísla, ztrátového činitele a paralelní kapacity s rostoucím časem expozice je dobře vidět u dielektrických materiálů B. Toto je patrné u všech teplot stárnutí. Lokální trend poklesu průběhů relativní permitivity, ztrátového čísla, ztrátového činitele a paralelní kapacity s rostoucím časem expozice, při všech teplotách stárnutí je vidět i u dielektrických materiálů A. Toto je patrné u všech teplot stárnutí, kromě teploty stárnutí 170 °C. Lokální trend u dielektrických materiálů C a D se nedá jasně určit. Tento typ je uveden v přílohách 13-31.

## 3.5 Využití vyhodnocených výsledků měření

Výsledky měření vyšly podle teoretických předpokladů. Měřené dielektrické materiály mají různé vlastnosti, které se většinou určitým způsobem mění při různých teplotách stárnutí a časech expozice. Případné použití těchto dielektrických materiálů záleží na konkrétním zadaném úkolu.

Jaký z měřených dielektrických materiálů by byl nejlepší pro použití v kondenzátorech ve střídavém elektrickém poli při běžných teplotách? Dielektrické materiály A nebudou vůbec

brány v úvahu, protože nebyly k dispozici jejich dodané stavy. V závorce je vždy uvedeno pořadí dielektrických materiálů od největší hodnoty zkoumané veličiny po nejmenší. Je potřeba, aby dielektrikum kondenzátoru mělo co největší kapacitu (B, D, C) a z ní vyplývající hodnotu relativní permitivity (B, D, C) a dále co nejmenší pokles těchto dielektrických vlastností s rostoucí frekvencí (B, D, C). Také je potřeba, aby hodnoty ztrátového čísla (B, D, C) a ztrátového činitele (B, D, C) byly co nejmenší. Tyto dielektrické vlastnosti totiž představují velikost ztrát v dielektriku. Problém je takový, že s rostoucí kapacitou, respektive relativní permitivitou, rostou i dielektrické ztráty v dielektrických materiálech. Je tedy nutné hledat určitý kompromis. Podle pořadí dielektrických materiálů v závorkách jsou nejlepšími dielektrikem pro použití v kondenzátorech při běžných teplotách dielektrické materiály D.

Při tepelném stárnutí dochází v dielektrických materiálech D ke změně molekulární struktury a tato změna vede ke snížení relativní permitivity. Na druhou stranu se ale sníží i celkové ztráty. U dielektrických materiálů C však dochází při tepelném stárnutí vlivem změn v molekulární struktuře k růstu relativní permitivity. Celkové ztráty se zvýší. Z uvedených výsledků vychází najevo, že vlivem tepelného stárnutí se dielektrické vlastnosti materiálů mění a je třeba to vzít v úvahu při návrhu materiálu pro konkrétní využití.

## Závěr

Při provozu elektrického zařízení jsou nejdůležitější podmínky prostředí, kde toto zařízení pracuje. Dielektrický podsystém je ze všech dílčích podsystémů elektrického zařízení nejvíce poruchový. Je tedy nejcitlivější na provozní namáhání, zvláště pak na teplotu prostředí. Z tohoto důvodu vznikl systém teplotních tříd. Teplotní třída je maximální hodnota teploty prostředí, pro kterou je určitý dielektrický materiál vhodný. Nejlepší by bylo ověřovat životnost dielektrických materiálů dlouhodobými zkouškami při reálných provozních podmínkách. Tento postup však není z časových a ekonomických důvodů proveditelný, a proto se používají zrychlené zkoušky. Vzorky zkoumaných dielektrických materiálů, které jsou měřeny v této práci, se podrobily zrychlenému tepelnému stárnutí při různých teplotách a časech expozice. Pro vyhodnocení změny jejich dielektrických vlastností je možné použít různé diagnostické metody.

V této práci je vyhodnocení provedeno metodou dielektrické spektroskopie, která patří mezi důležité nedestruktivní diagnostické metody ve frekvenční oblasti. Principem dielektrické spektroskopie pro střídavé pole je sledování odezvy polarizace částic na základě změny frekvence vnějšího elektrického pole. Používá se tam, kde dochází nějakým způsobem ke změnám elektrických dipólů nebo jejich vzájemné interakci uvnitř dielektrického materiálu. Tato metoda se používá například pro diagnostiku procesů stárnutí dielektrických materiálů, která je náplní předkládané práce a výsledky diagnostiky se pak využijí při návrhu dielektrických materiálů pro různé elektrotechnické aplikace. Pomocí zvolené metody byly vyhodnoceny důležité dielektrické vlastnosti dielektrických materiálů A, B, C a D v závislosti na frekvenci a časech expozice. Jednalo se hlavně o určení relativní permitivity a ztrát.

Vyhodnocení výsledků měření vyšlo podle teoretických předpokladů a je v práci přehledně uvedeno. Jak již bylo řečeno, dielektrický podsystém elektrického zařízení je ze všech jeho dílčích podsystémů nejvíce poruchový. Výzkum a vývoj dielektrických materiálů musí proto nadále pokračovat.

# Literatura

- [1] JAVORSKÝ, Leonid; BOBEK, Antonín; MUSIL, Rudolf. *Základy elektrotechniky*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981, 389 s. 04-513-81.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [3] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1990, 300 s. ISBN 80-7082-011-X; 04-513-81.
- [5] Elektrostatika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7.4.2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatika>
- [6] POLITIKASI, Gizlilik. *İyonik Bağlar* [online]. © 2002-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.fenokulu.net/portal/Sayfa.php?Git=KonuKategorileri&Sayfa=KonuBaslikListesi&baslikid=43&KonuID=175>
- [7] Covalent bonding. In: *Webchen a website for AS and A2 Chemistry students* [online]. 1.2.2005 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.webchem.net/notes/chemical\\_bonding/covalent\\_bonding.htm](http://www.webchem.net/notes/chemical_bonding/covalent_bonding.htm)
- [8] Metallic bond. *The Encyklopedia of Science* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/metallic\\_bond.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/metallic_bond.html)
- [9] Vodíková (hydrogenová) vazba a její vlastnosti. In: *Hornicko-geologická fakulta Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/voda/fyzikalni/hydrog\\_vaz.htm](http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/voda/fyzikalni/hydrog_vaz.htm)
- [10] ALOTROPOWE ODMIANY WĘGLA. In: *Bryk strefa wiedzy* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.bryk.pl/teksty/liceum/chemia/chemia\\_organiczna/15477-alotropowe\\_odmiany\\_w%C4%99gla.html](http://www.bryk.pl/teksty/liceum/chemia/chemia_organiczna/15477-alotropowe_odmiany_w%C4%99gla.html)
- [11] Tvary krystalů. In: KÜHN, Jiří. *Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/ugmz/mineral/tvary.html>
- [12] Intenzita elektrického pole. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 15.4.2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Intenzita\\_elektrick%C3%A9ho\\_pole](http://cs.wikipedia.org/wiki/Intenzita_elektrick%C3%A9ho_pole)
- [13] Elektrická indukce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 31.12.2011 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1\\_indukce](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_indukce)
- [14] Permittivita. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 10.1.2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Relativn%C3%AD\\_permittivita#Relativn.C3.AD\\_permittivita](http://cs.wikipedia.org/wiki/Relativn%C3%AD_permittivita#Relativn.C3.AD_permittivita)

- [15] DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TUHÝCH LÁTEK. In: MOLHANEC, Martin. *K13113-Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze* [online]. 7.2.2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_4.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf)
- [16] Vazby v krystalech. In: REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/628-vazby-v-krystalech>
- [17] JANOUŠ. II. Statické elektrické pole v dielektriku. In: JANOUŠ. *Pomocné texty předmětu ELEKTROTECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.janous.cz/sub/jcueltech/04b\\_izolanty.pdf](http://www.janous.cz/sub/jcueltech/04b_izolanty.pdf)
- [18] Agilent Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers. In: *Agilent Technologies* [online]. 28.10.2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5980-2862EN.pdf>
- [19] Agilent Accessories Selection Guide For Impedance Measurements. In: *Agilent Technologies* [online]. 17.8.2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-4792E.pdf>
- [20] Agilent 16451B DIELECTRIC MATERIAL TEST FIXTURE Operation Manual. In: *Agilent Technologies* [online]. Červen 2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/16451-90020.pdf>
- [22] MENTLÍK, Václav; POLANSKÝ, Radek; PROSR, Pavel. TERMICKÉ ANALÝZY A ELEKTROTECHNICKÝ DESIGN. In: *Institute of Chemical Process Fundamentals of the ASCR, v. v. i.* [online]. © 2010-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [www.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/KS2009\\_Mentlik.ppt](http://www.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/KS2009_Mentlik.ppt)
- [23] Microwave Dielectric Spectroscopy Workshop. In: *Agilent Technologies* [online]. © 2000-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.home.agilent.com/upload/cmc\\_upload/All/MWDielectricSpectroscopyWS.pdf?&cc=CZ&lc=eng](http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/MWDielectricSpectroscopyWS.pdf?&cc=CZ&lc=eng)
- [24] MAŽÁTKO, Jan; FOITOVÁ, Eva. *Elektronika-Elektronické součástky a základní obvody*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1979, 475 s. 04-508-79.
- [25] Agilent E4980A Precision LCR Meter. In: *Agilent Technologies* [online]. 26.7.2011 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-4435EN.pdf>
- [28] Klasifikace krystalů. In: KOVANDOVÁ, Monika. *Techmania Science Center* [online]. © 2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=596](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=596)
- [29] FRYBERT, Jan. POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ A ANALÝZA DIELEKTRICKÝCH SPEKTER. In: *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28646](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28646)
- [30] Izolant. In: REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/228-izolant>
- [31] GREGOROVÁ, Dagmar. Když voda mrzne při mínus čtyřicítce. In: *Osel Objective Source E-Learning* [online]. 26.11.2011 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6007>



[32] Voda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 3.5.2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Voda>

[33] Statické elektrické pole v dielektriku. In: *Katedra fyziky Př OU informace studentům* [online]. © 2005 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://artemis.osu.cz/fypx2/prednasky/FYPY2\\_2.ppt](http://artemis.osu.cz/fypx2/prednasky/FYPY2_2.ppt)

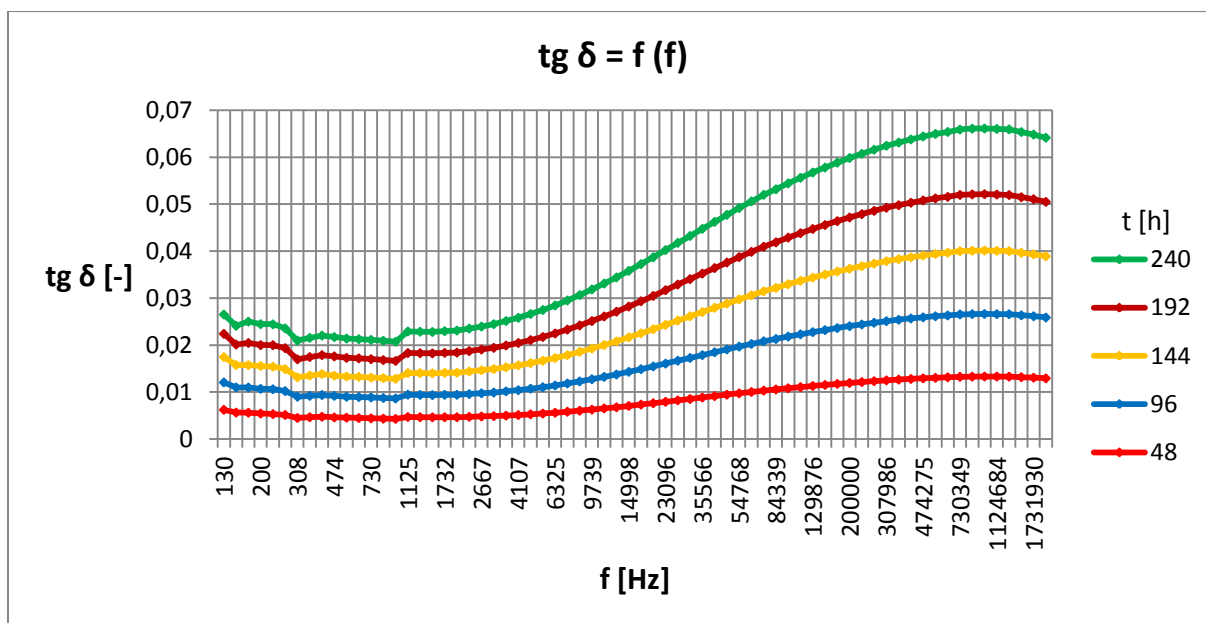
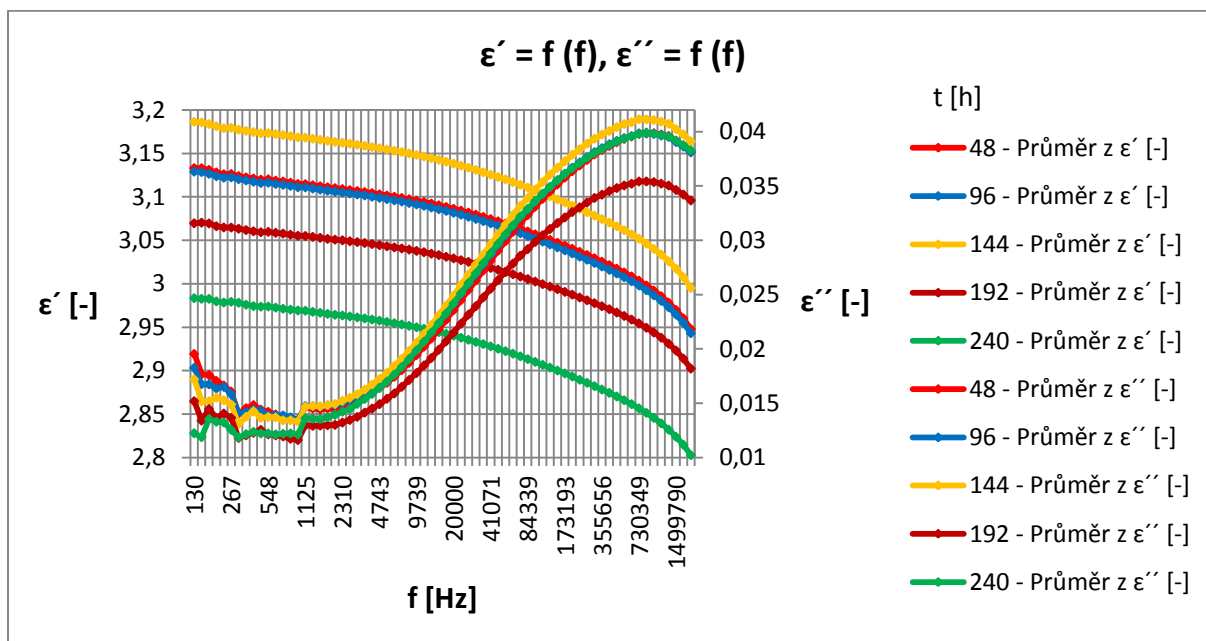
[34] Laboratorní cvičení – dielektrické materiály. In: *Laboratoře UETE* [online]. © 2010-2012 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: <http://laboratore.ucte.feec.vutbr.cz/soubory/ulohy/zadani/2-1.pdf>

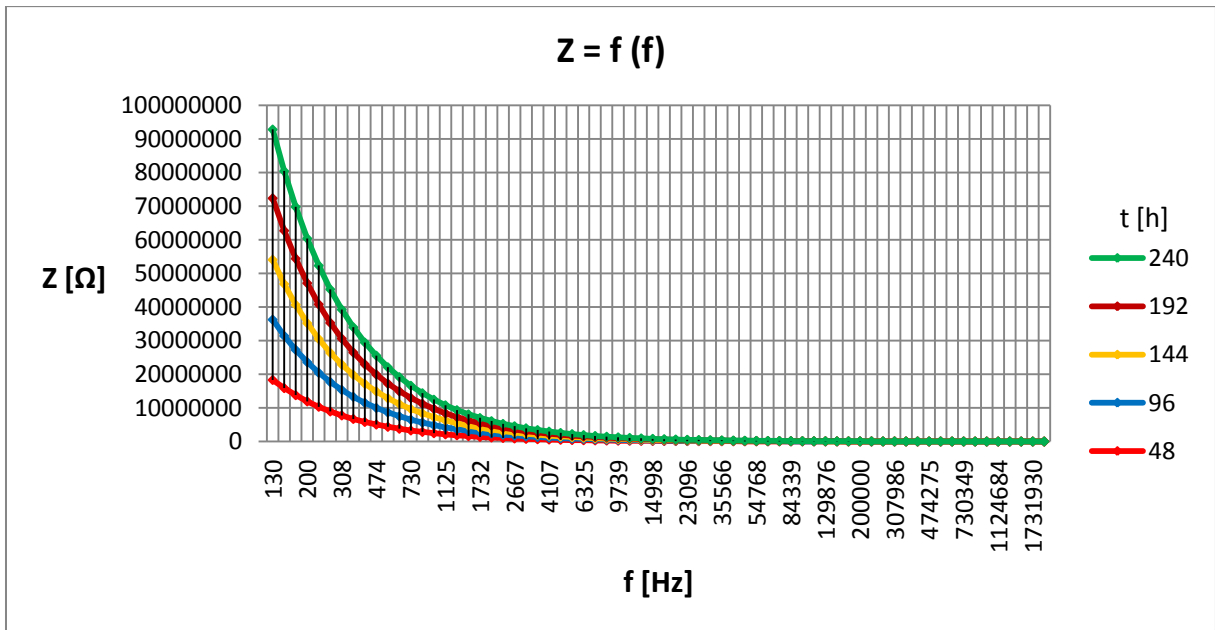
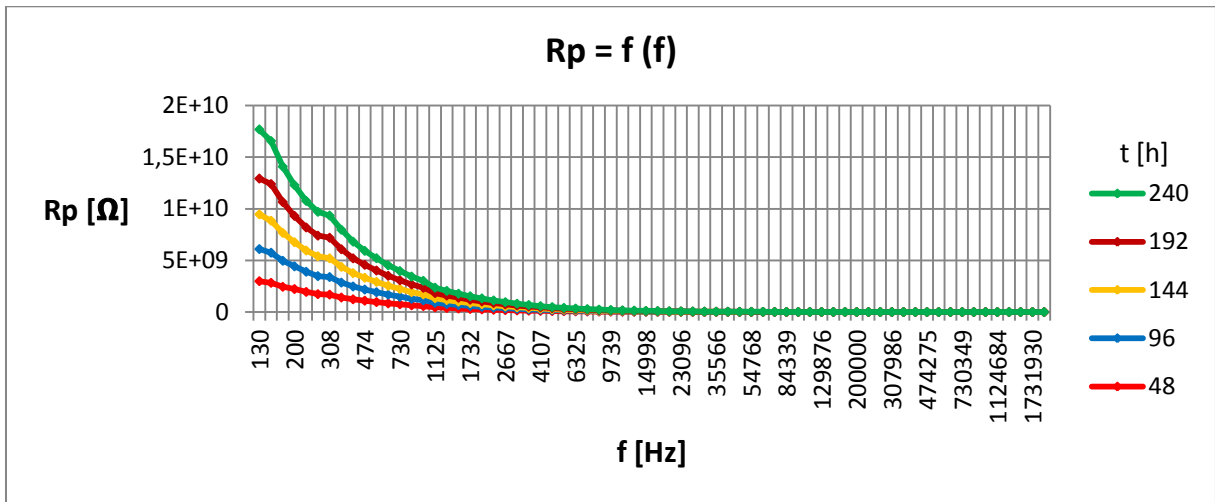
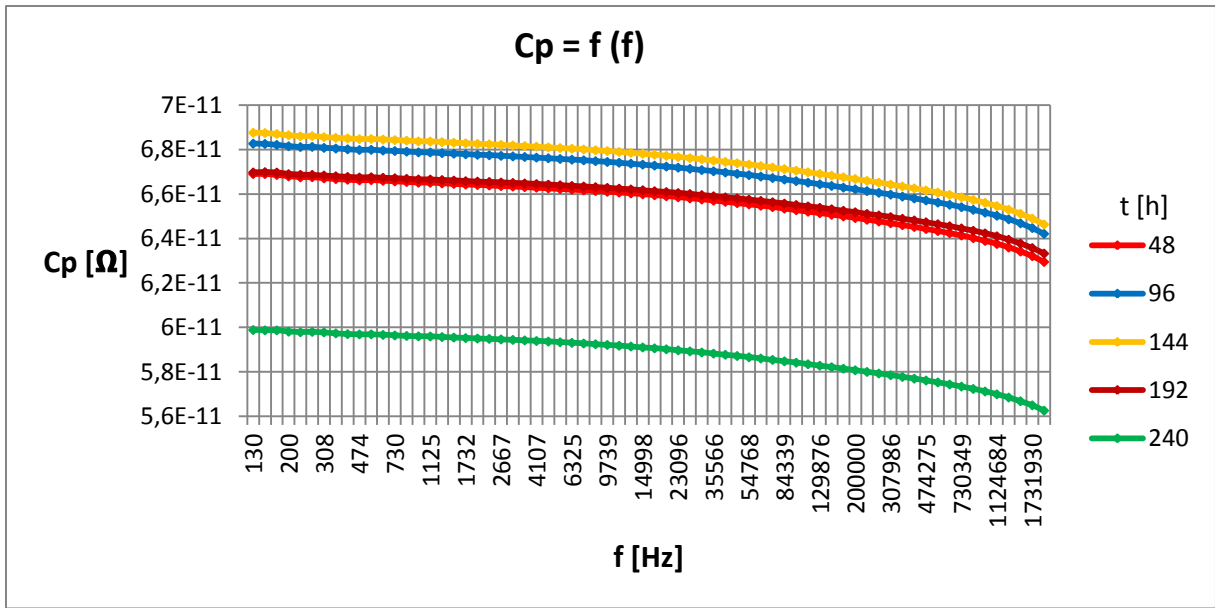
[35] Klasifikace krystalů. In: KOVANDOVÁ, Monika. *Techmania Science Center* [online]. © 2008 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=596](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=596)

# Přílohy

## Příloha 1

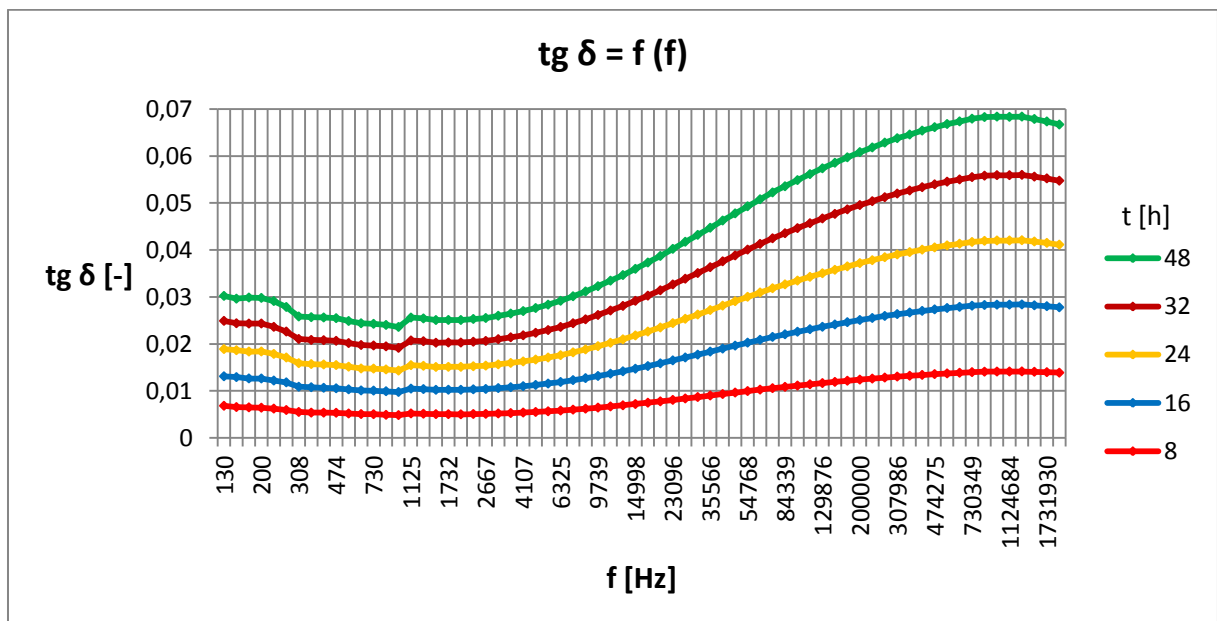
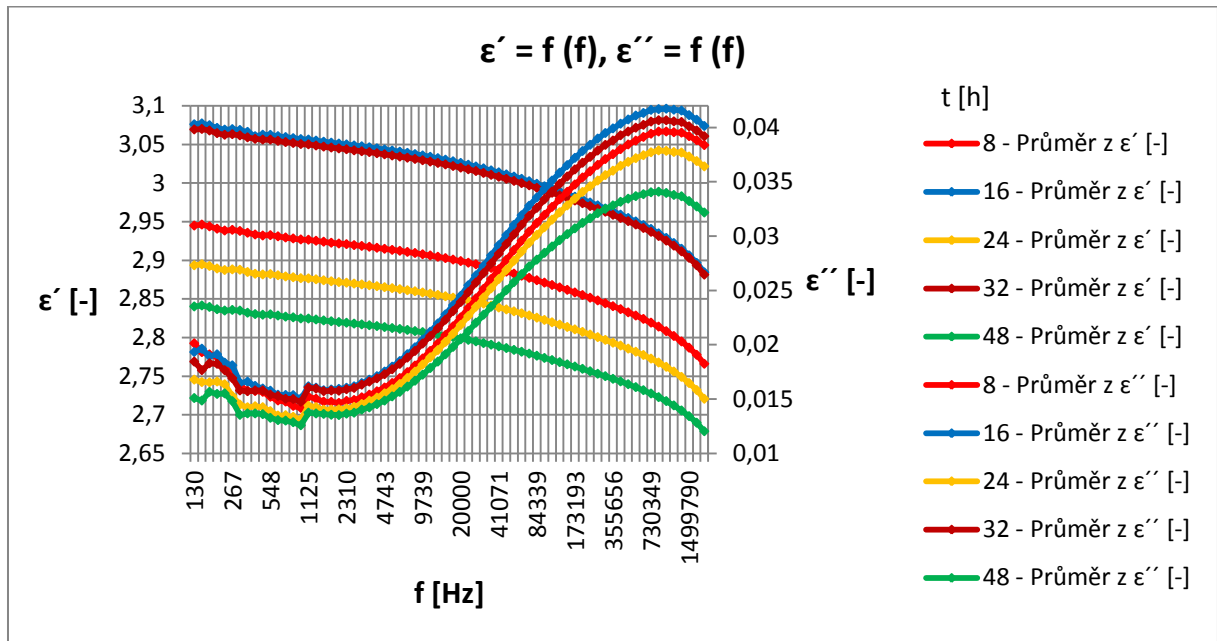
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=175\text{ °C}$	t=48 h (červená) t=96 h (modrá) t=144 h (oranžová) t=192 h (tmavě červená) t=240 h (zelená)

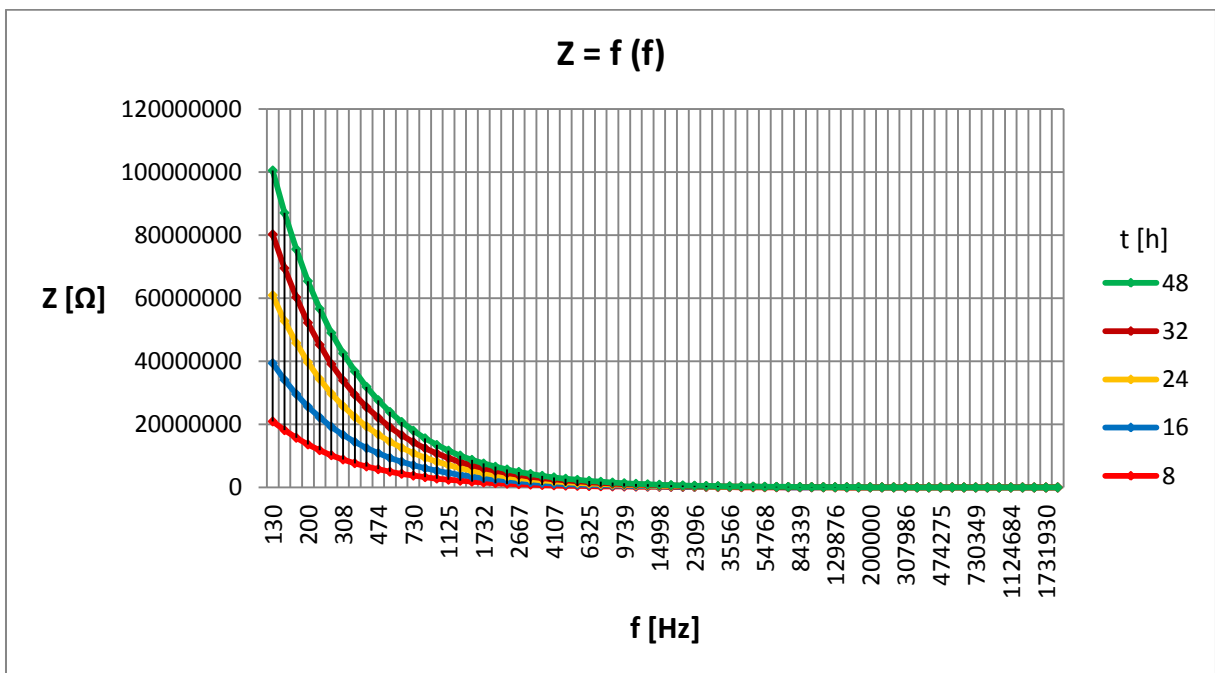
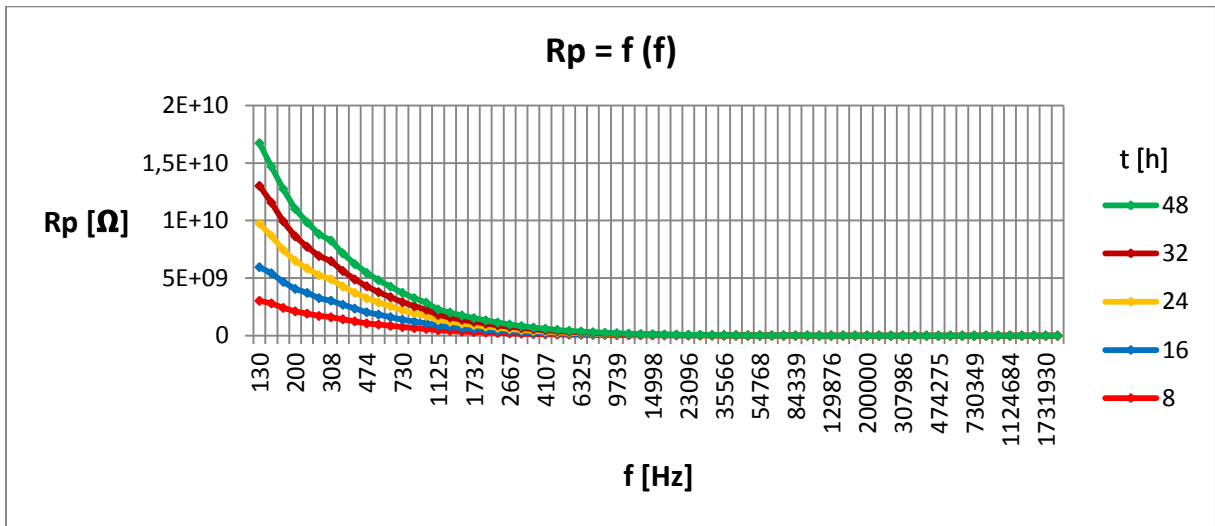
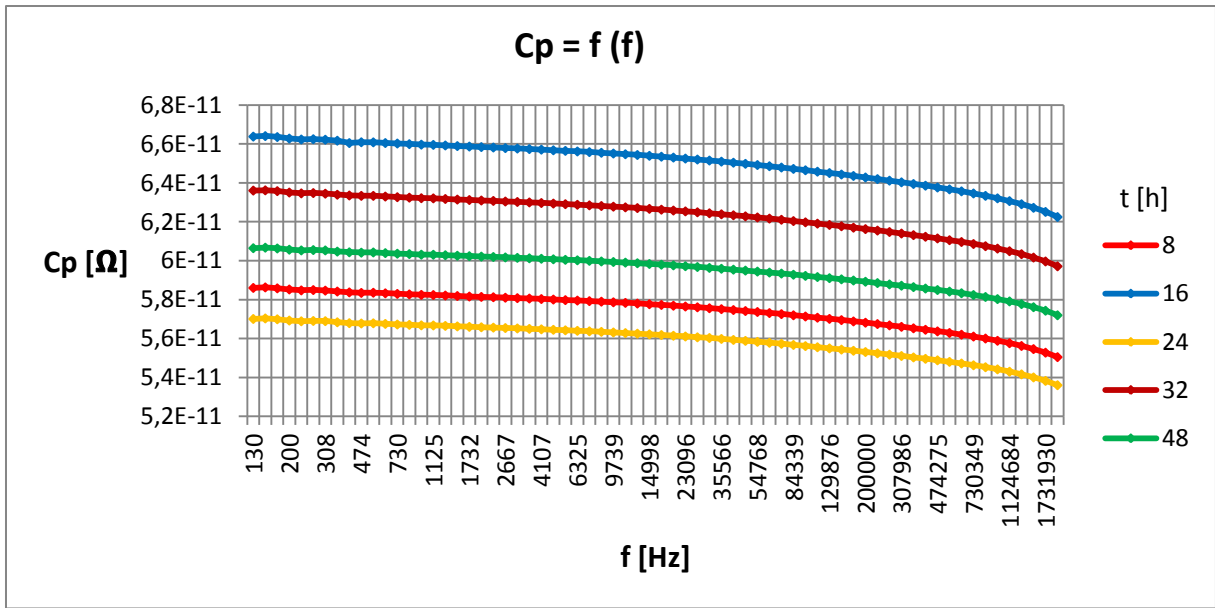




Příloha 2

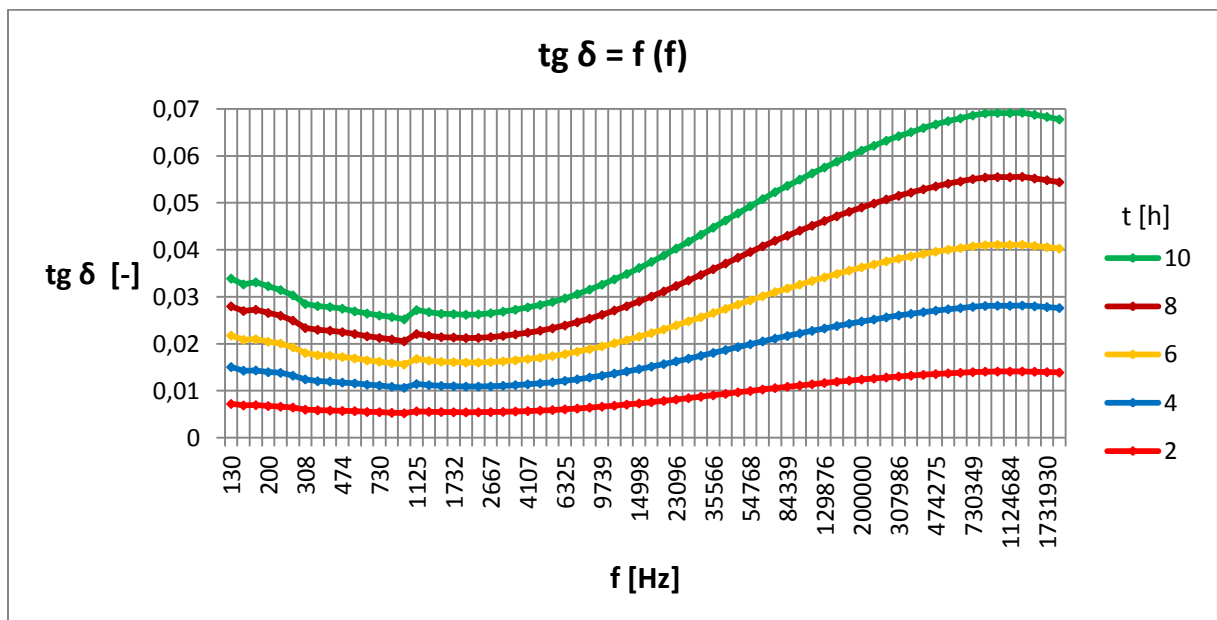
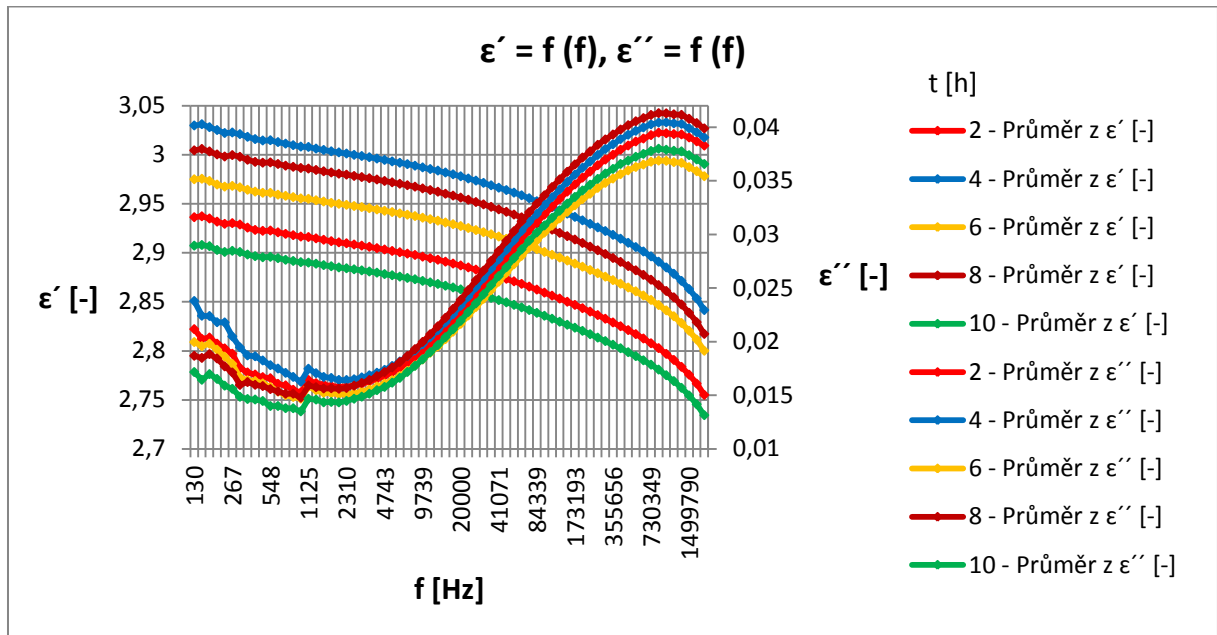
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=180\text{ °C}$	t=8 h (červená) t=16 h (modrá) t=24 h (oranžová) t=32 h (tmavě červená) t=48 h (zelená)

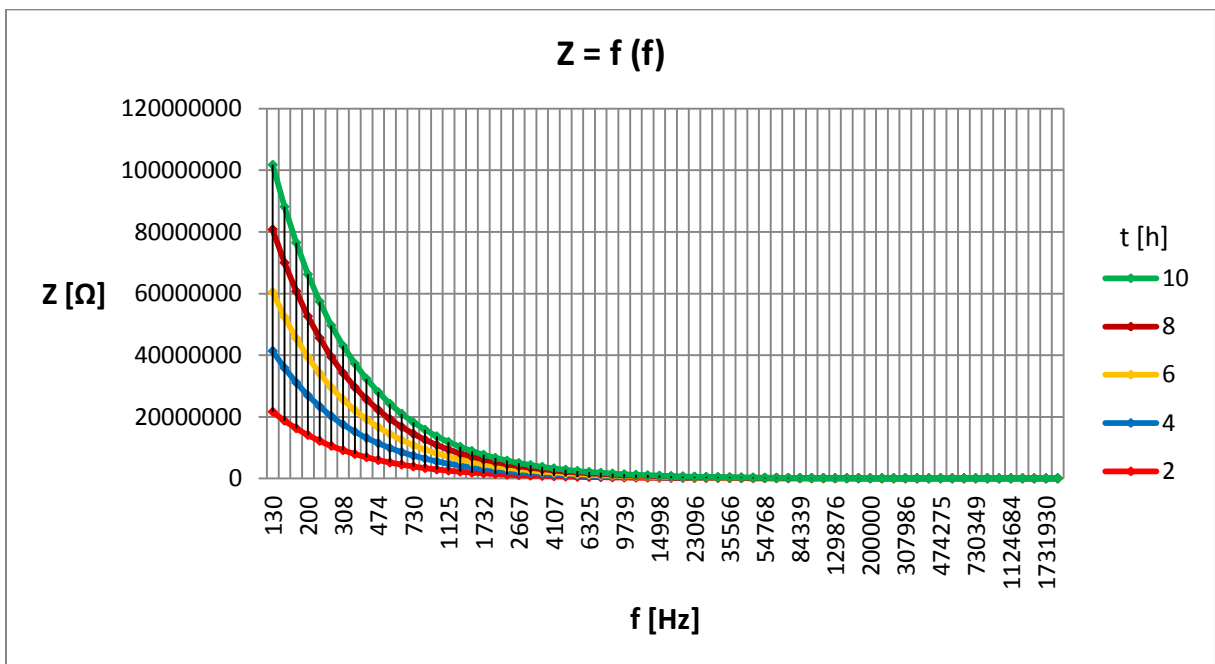
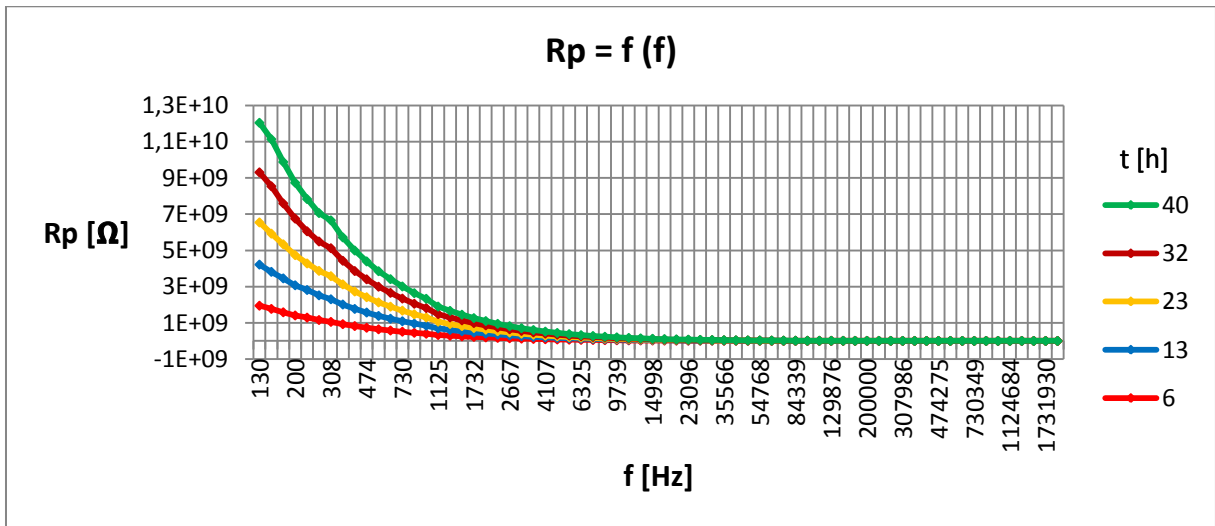
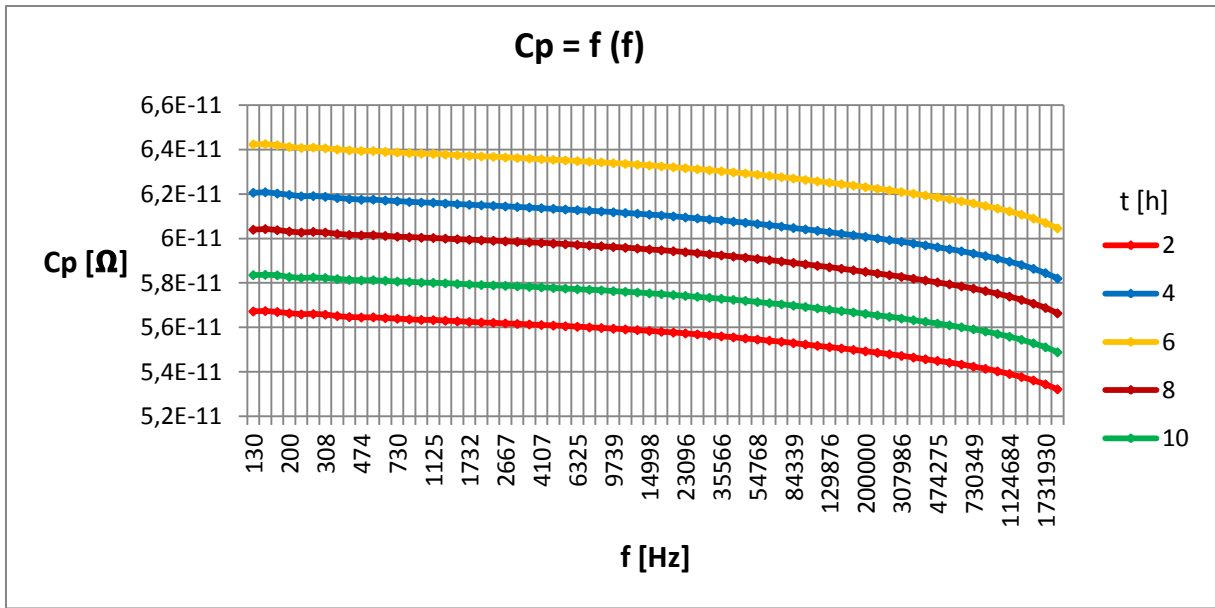




### Příloha 3

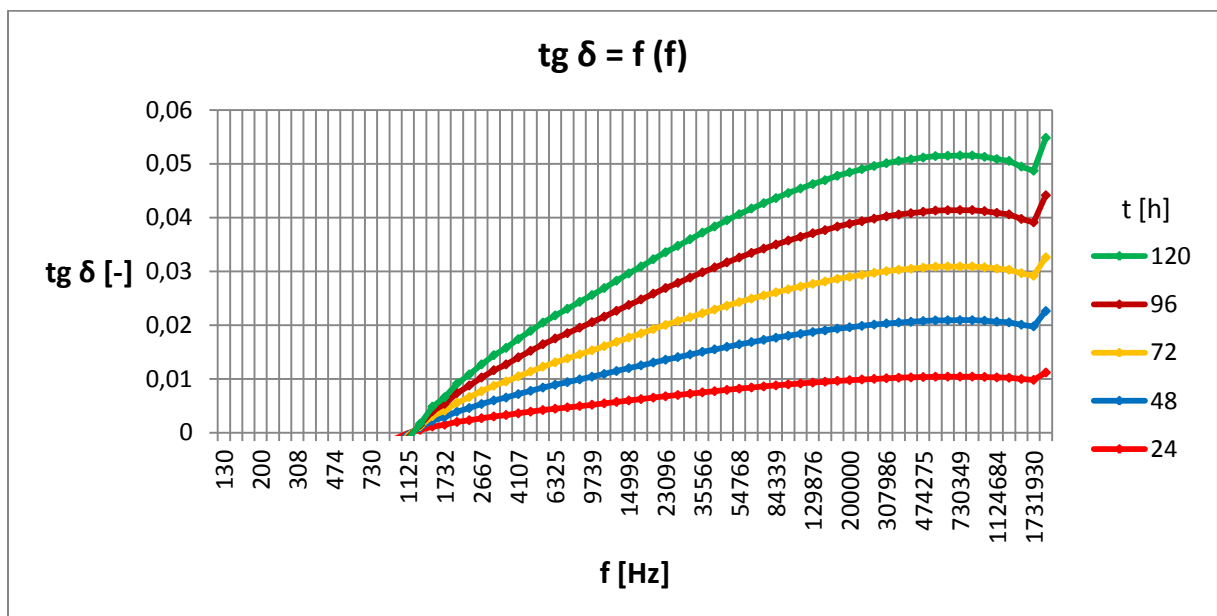
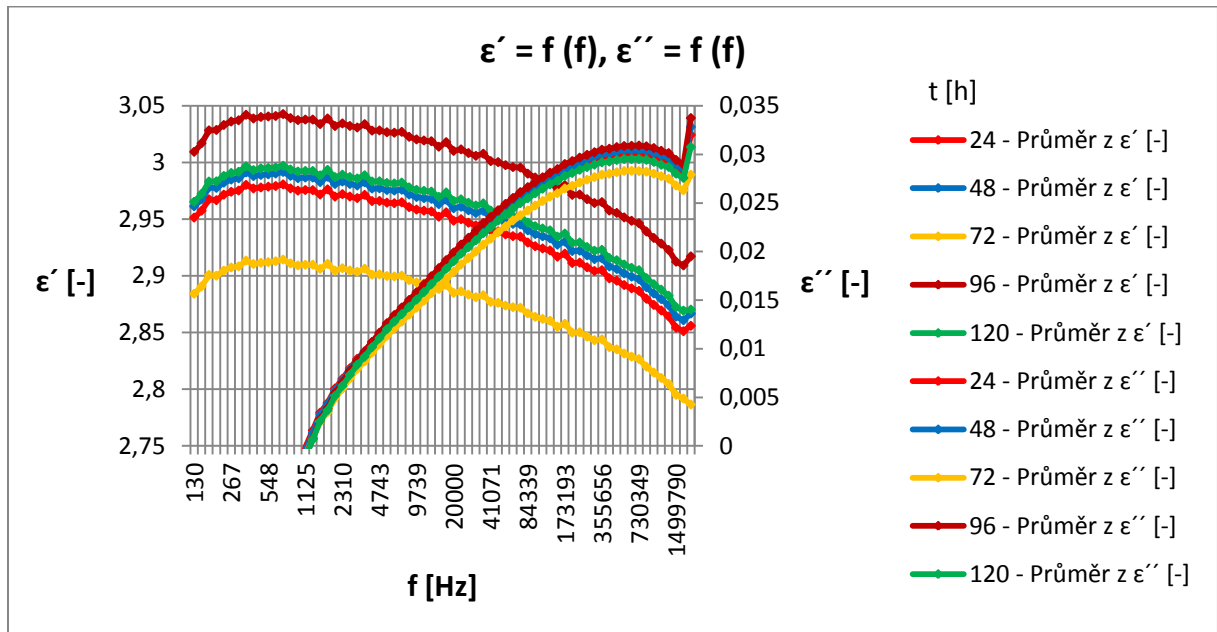
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
C	$\vartheta=186\text{ °C}$	t=192 h (červená) t=288 h (modrá) t=384 h (oranžová) t=480 h (tmavě červená) t=600 h (zelená)



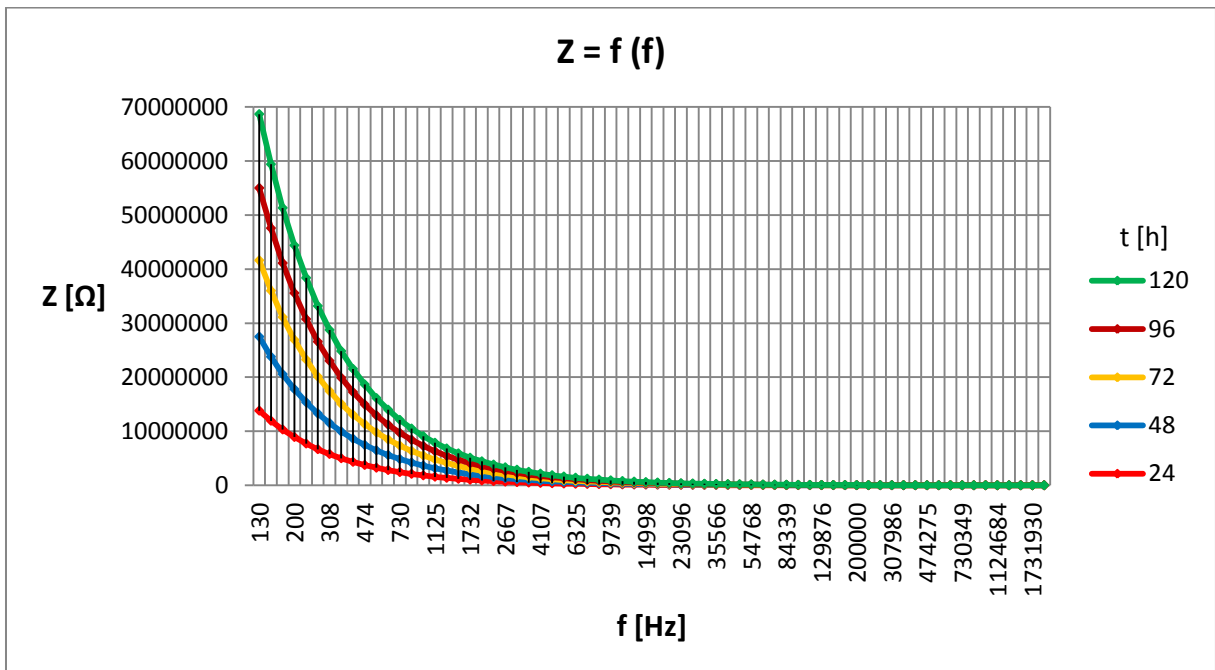
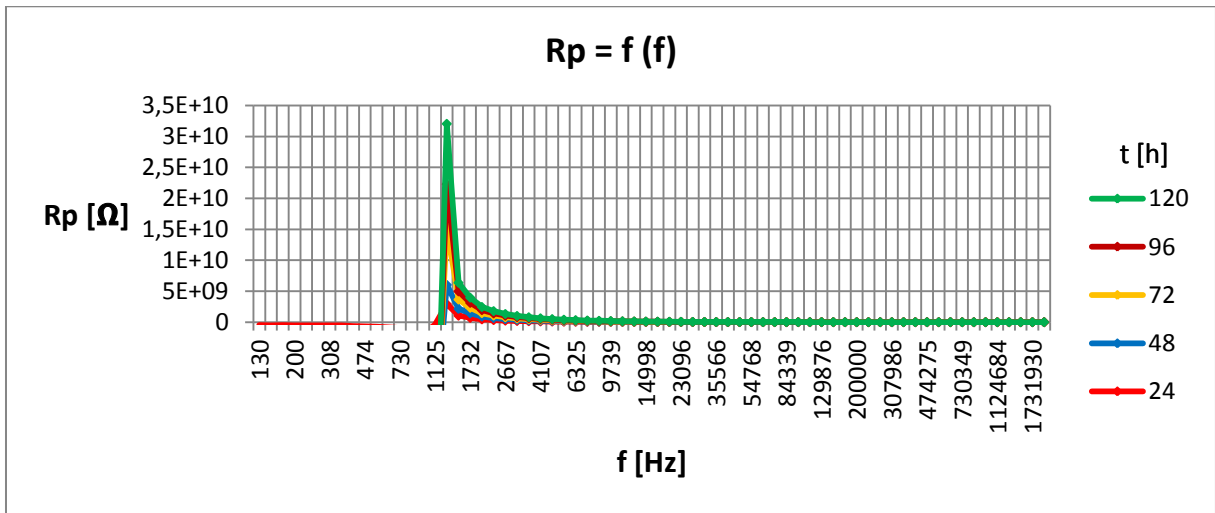
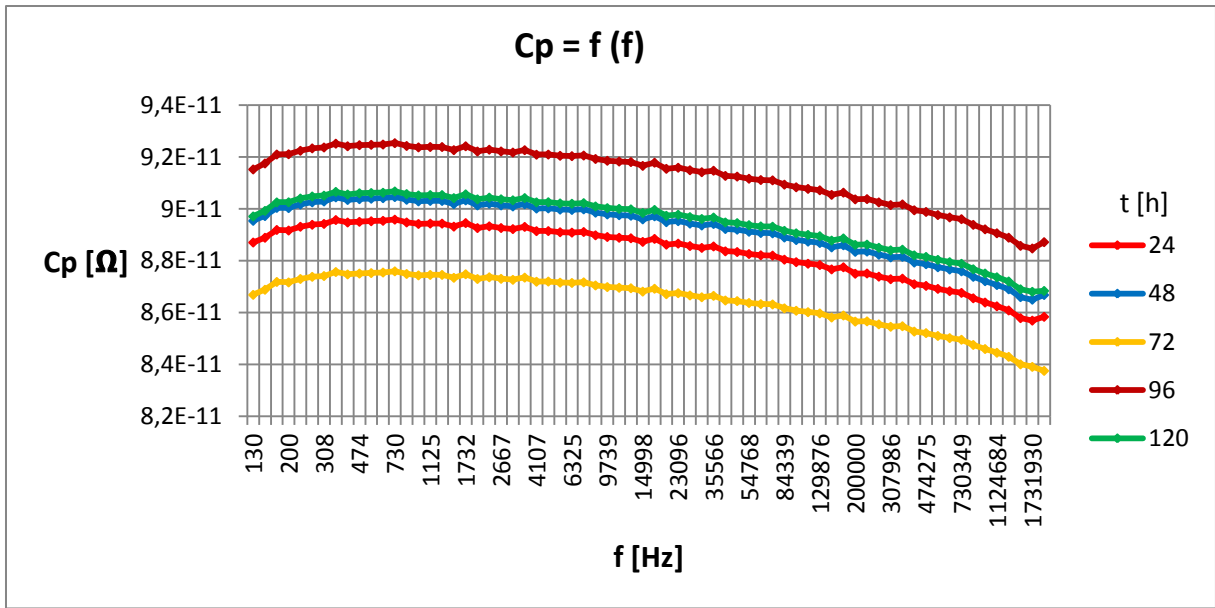


### Příloha 4

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=178\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=72 h (oranžová) t=96 h (tmavě červená) t=120 h (zelená)

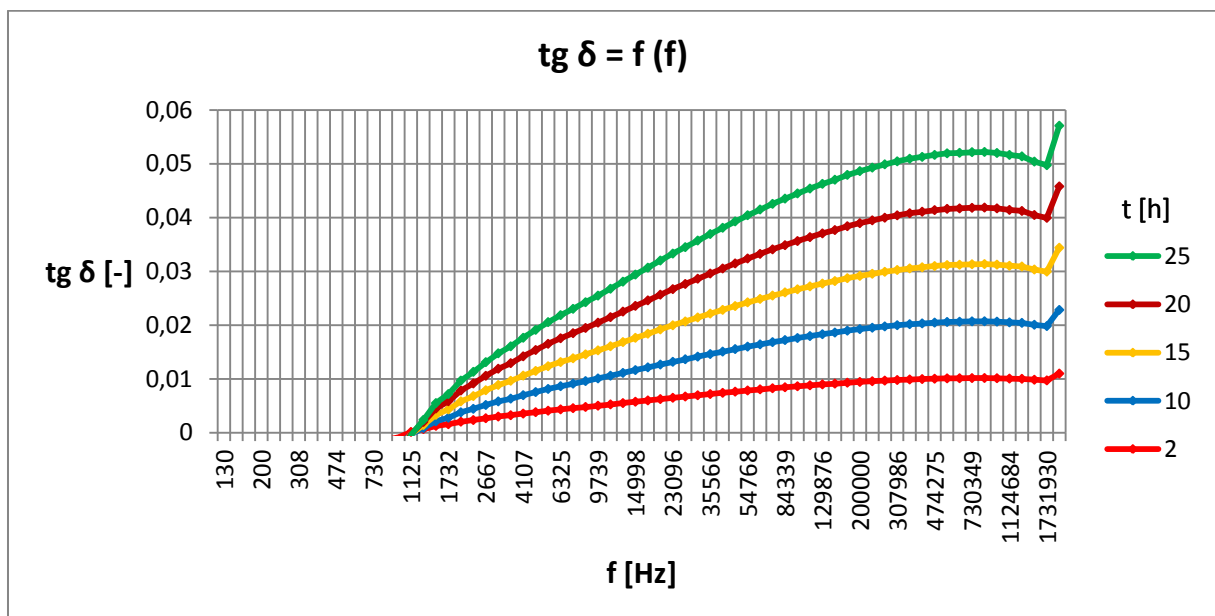
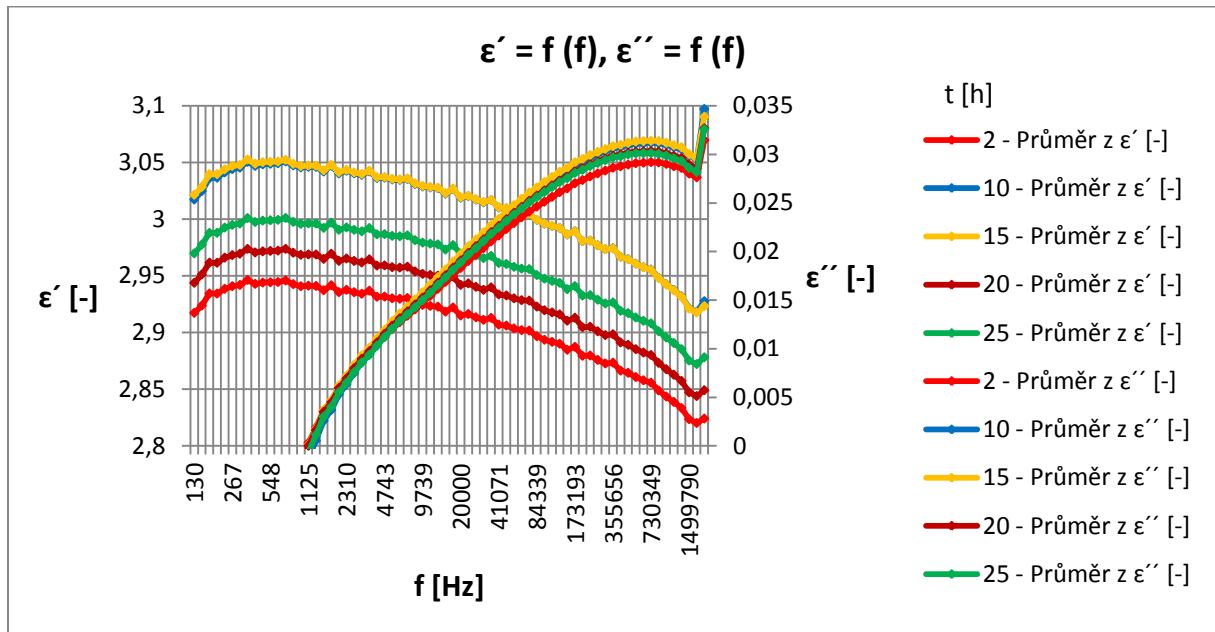


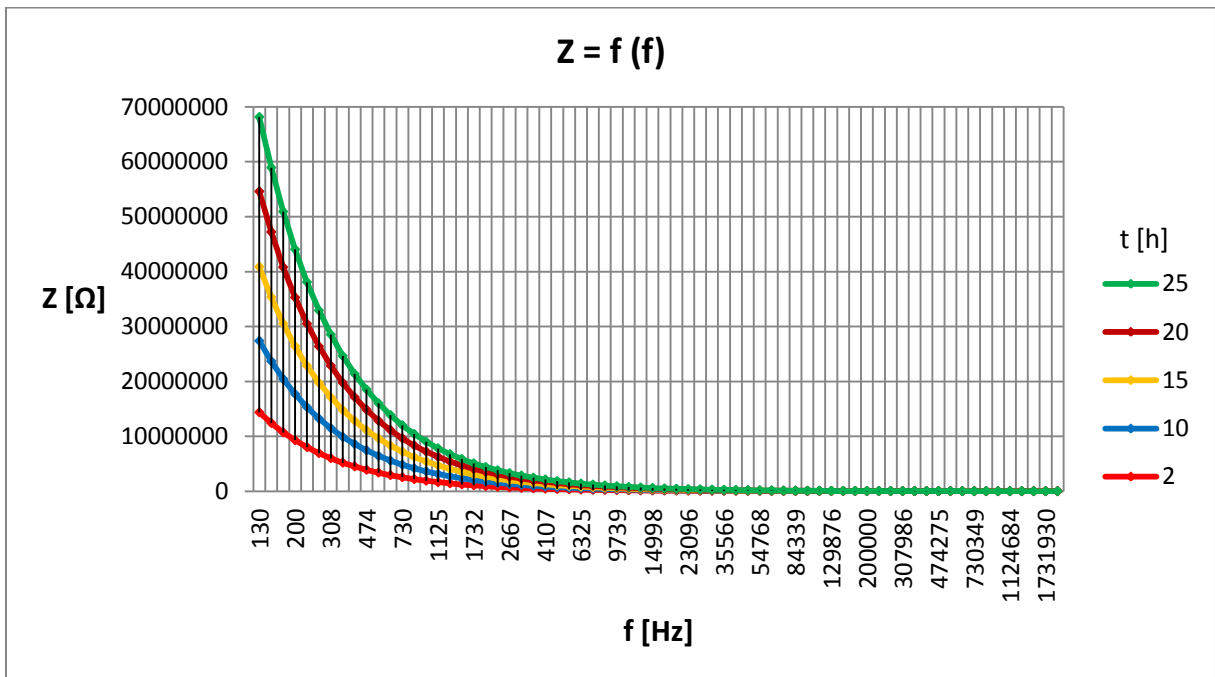
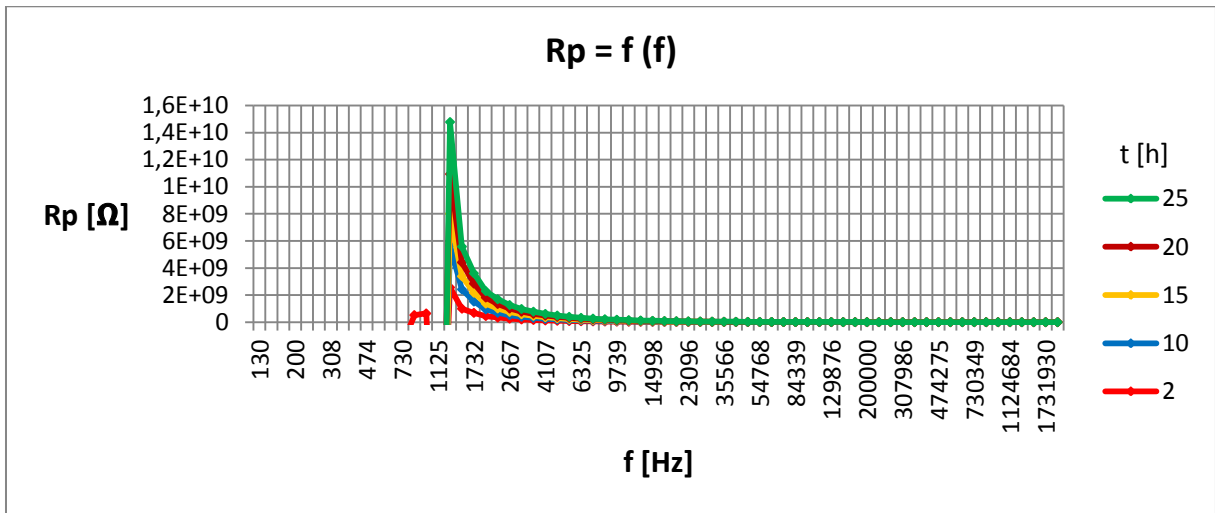
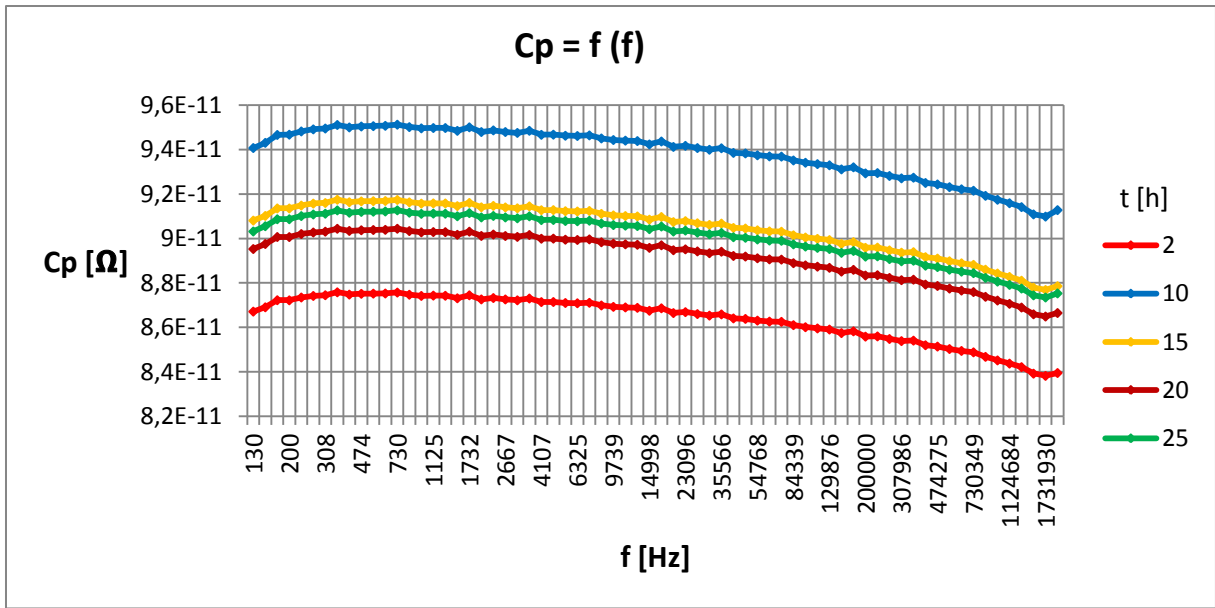




Příloha 5

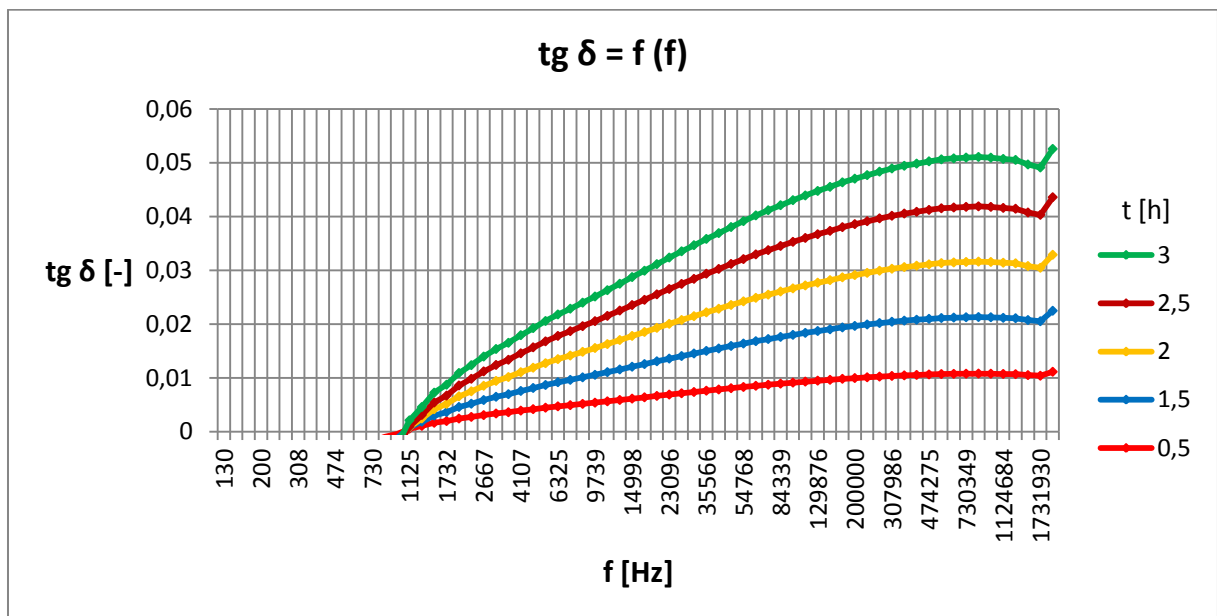
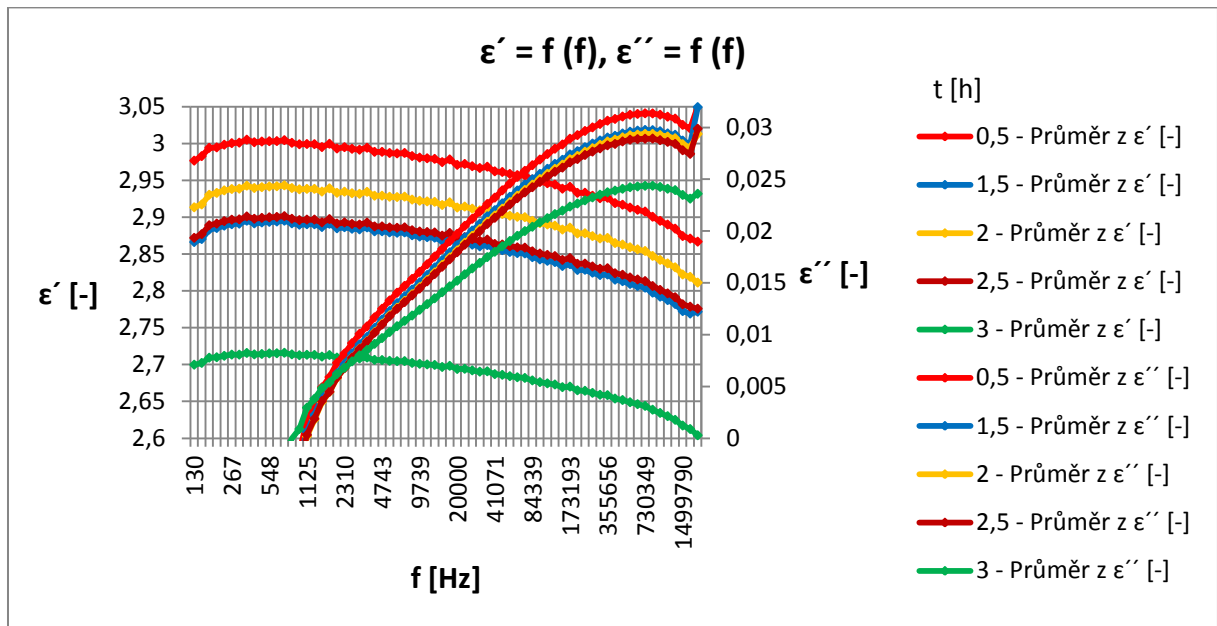
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=186\text{ °C}$	t=2 h (červená) t=10 h (modrá) t=15 h (oranžová) t=20 h (tmavě červená) t=25 h (zelená)

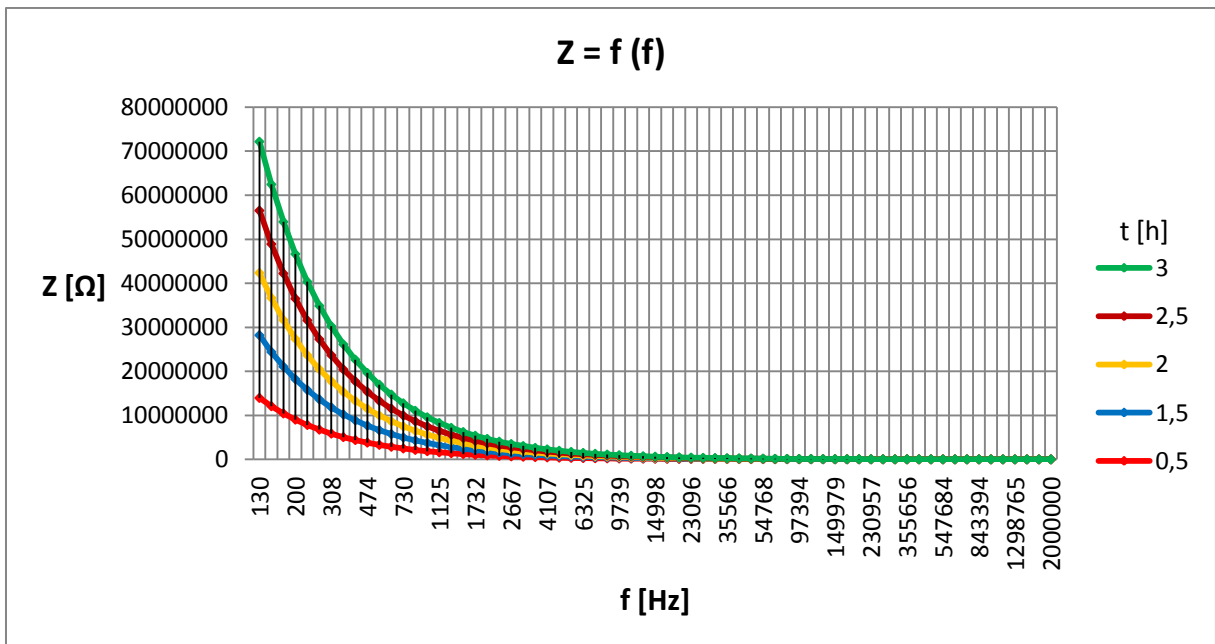
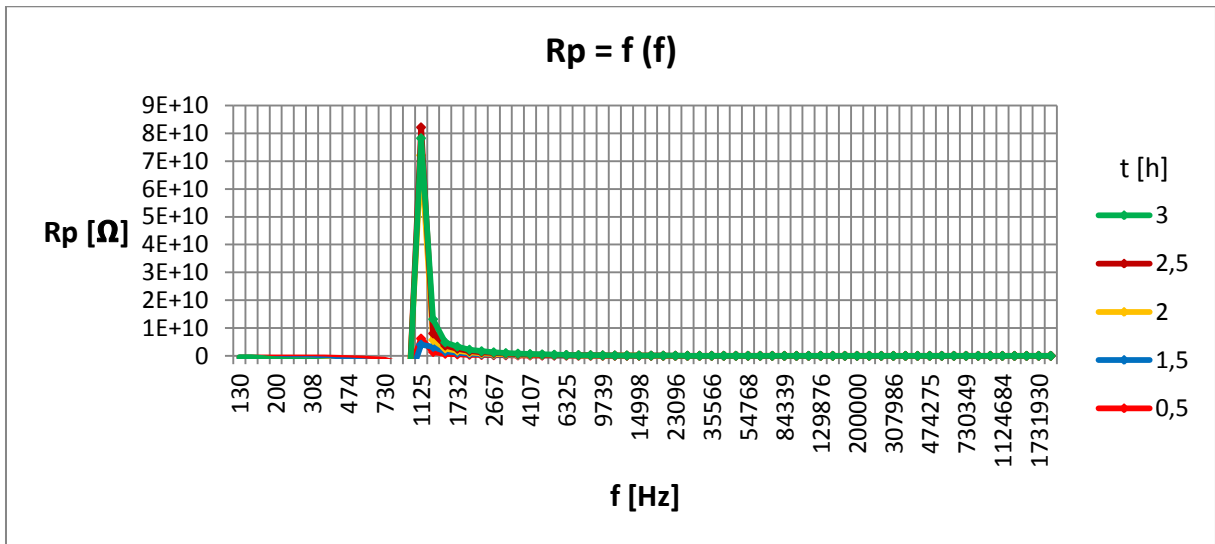
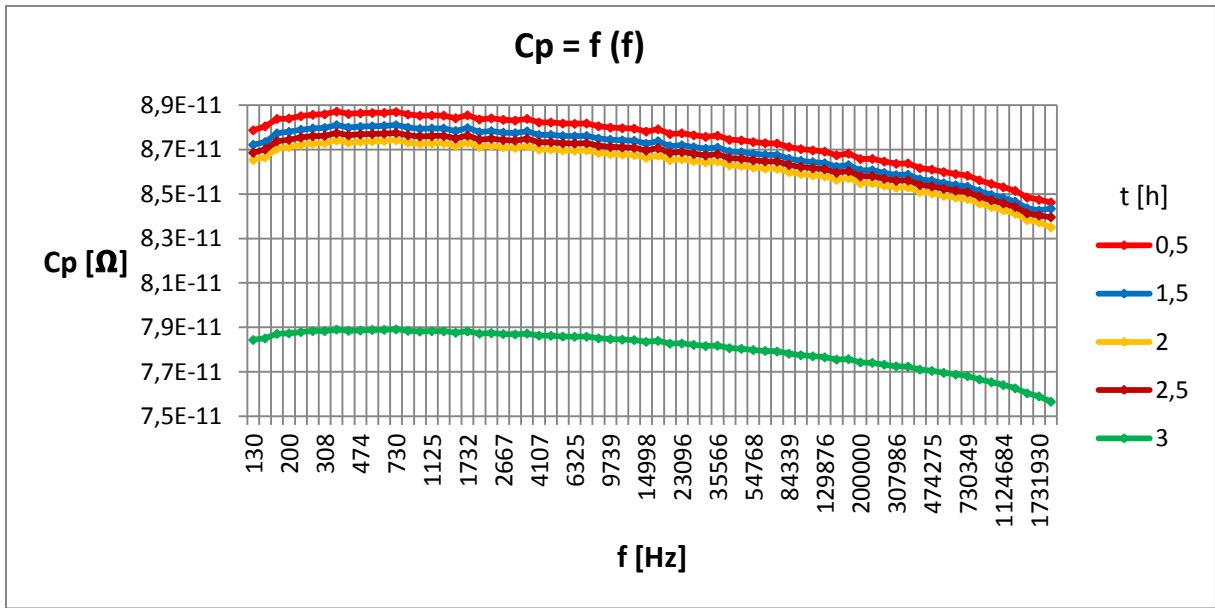




## Příloha 6

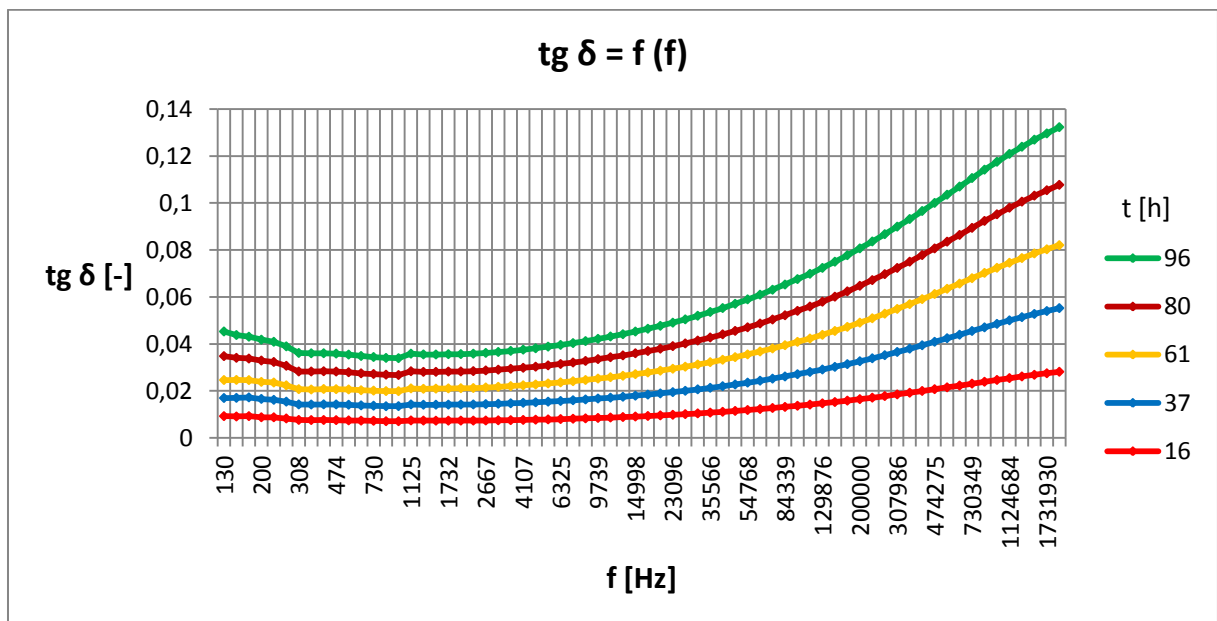
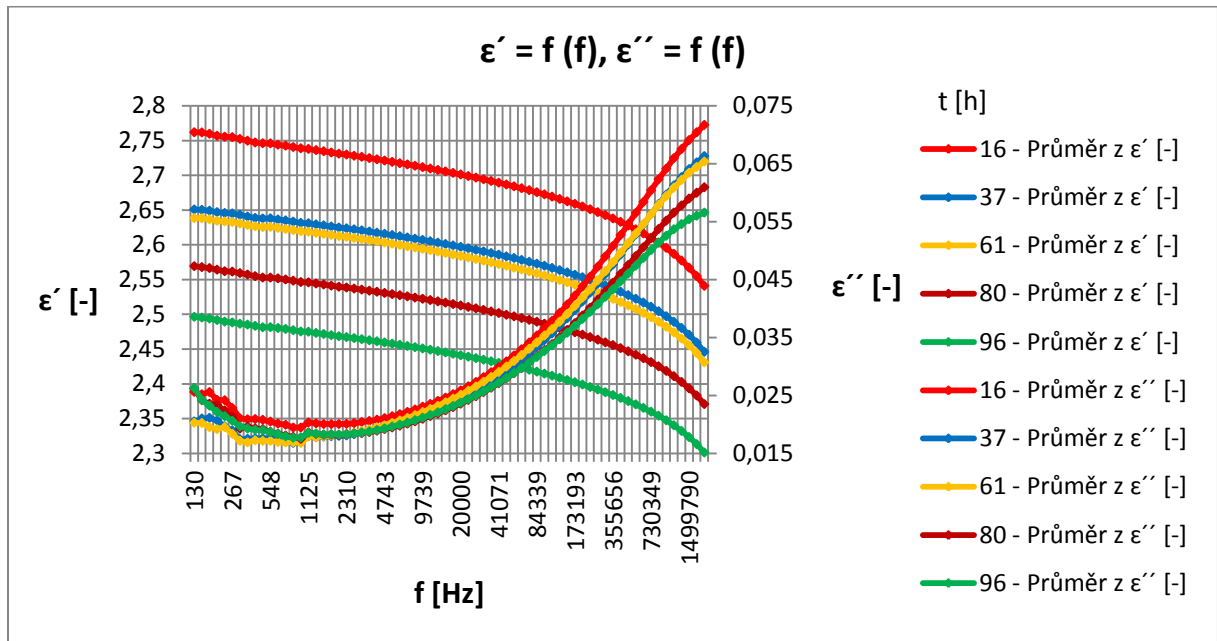
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
D	$\vartheta=194\text{ °C}$	t=0,5 h (červená) t=1,5 h (modrá) t=2 h (oranžová) t=2,5 h (tmavě červená) t=3 h (zelená)

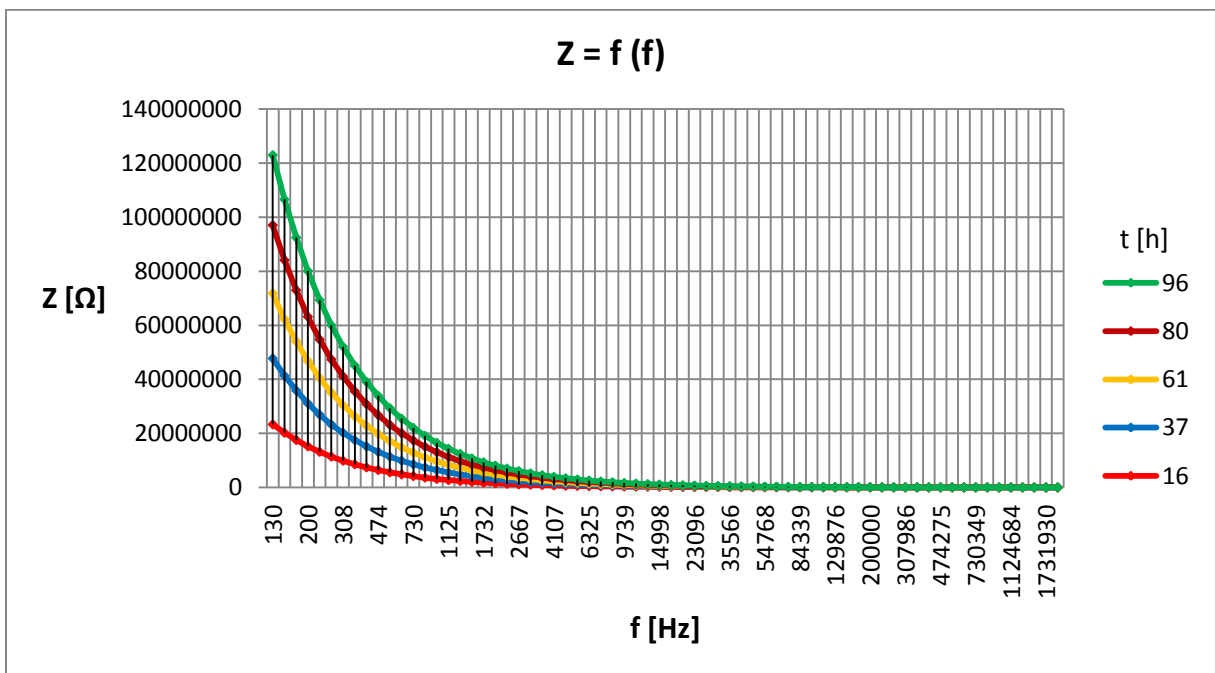
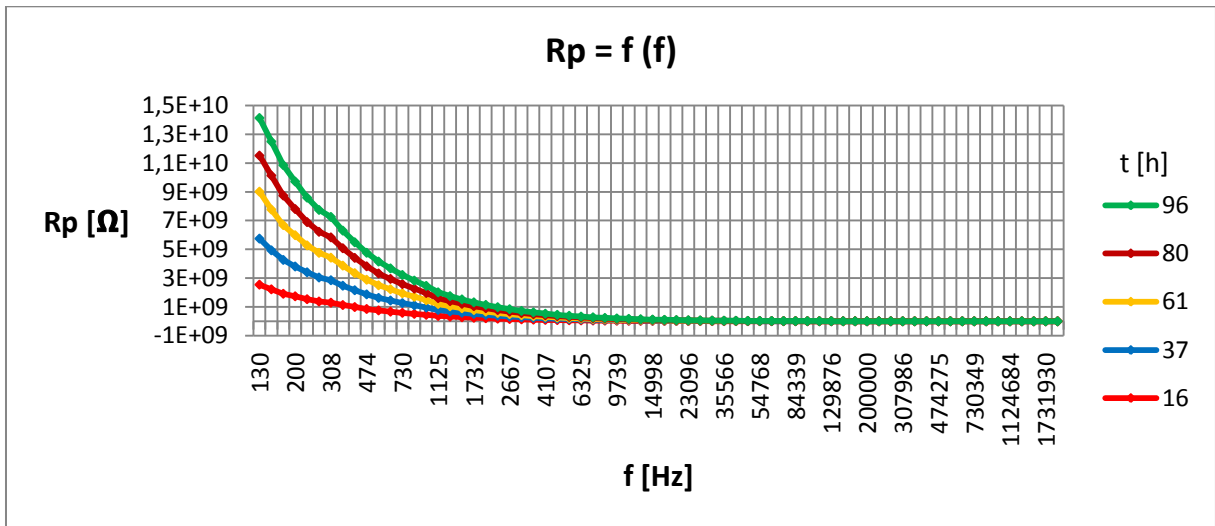
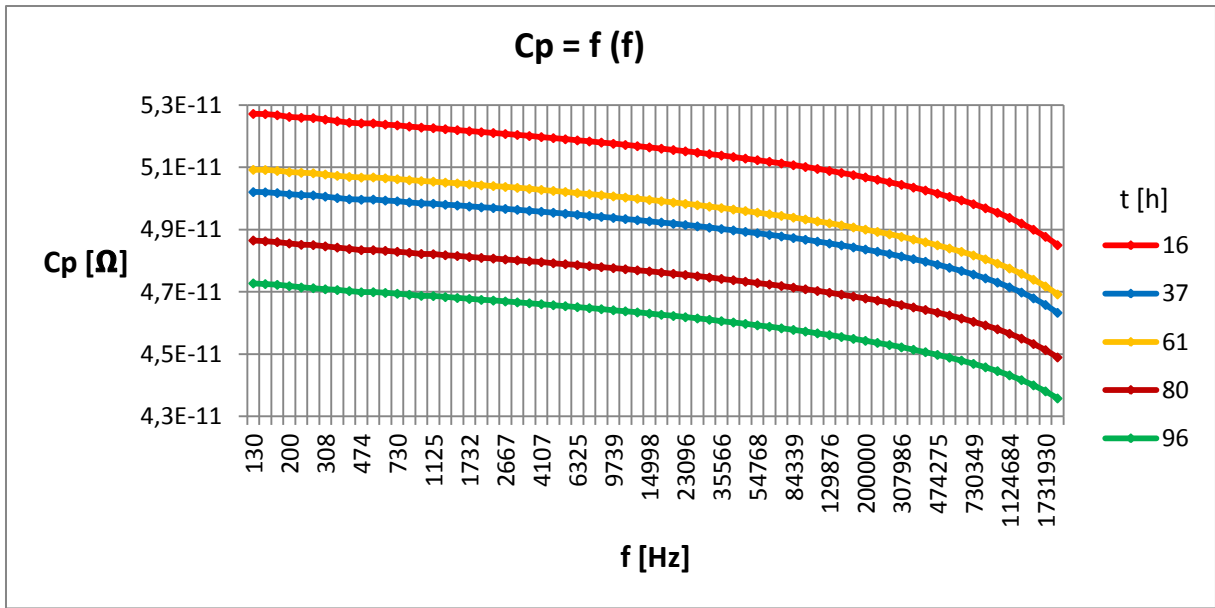




Příloha 7

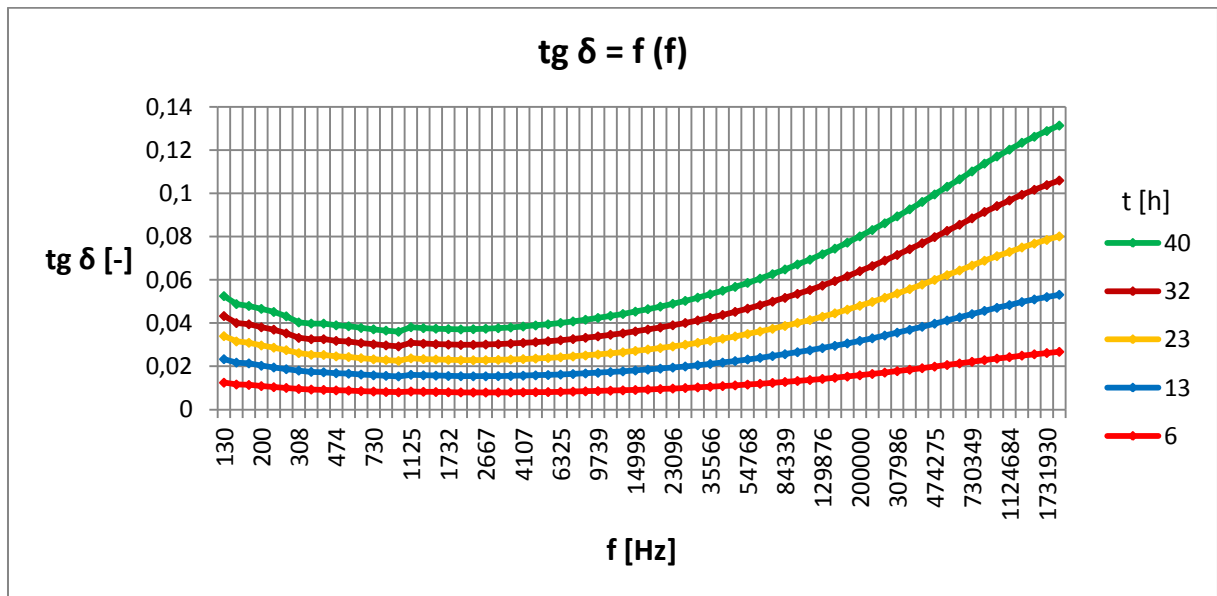
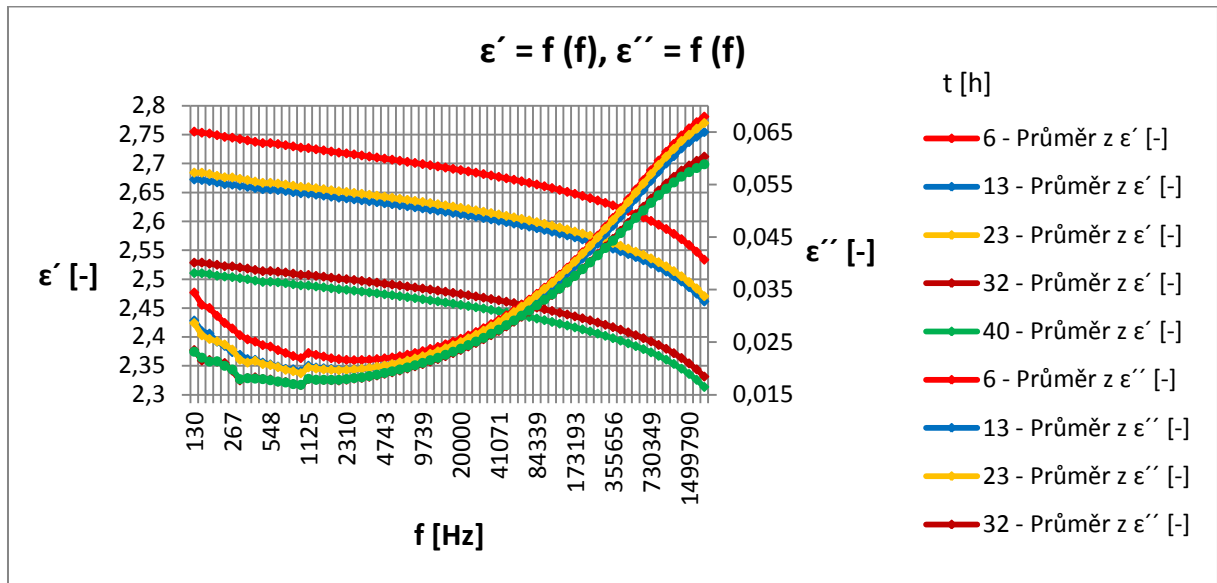
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=180\text{ °C}$	t=16 h (červená) t=37 h (modrá) t=61 h (oranžová) t=80 h (tmavě červená) t=96 h (zelená)



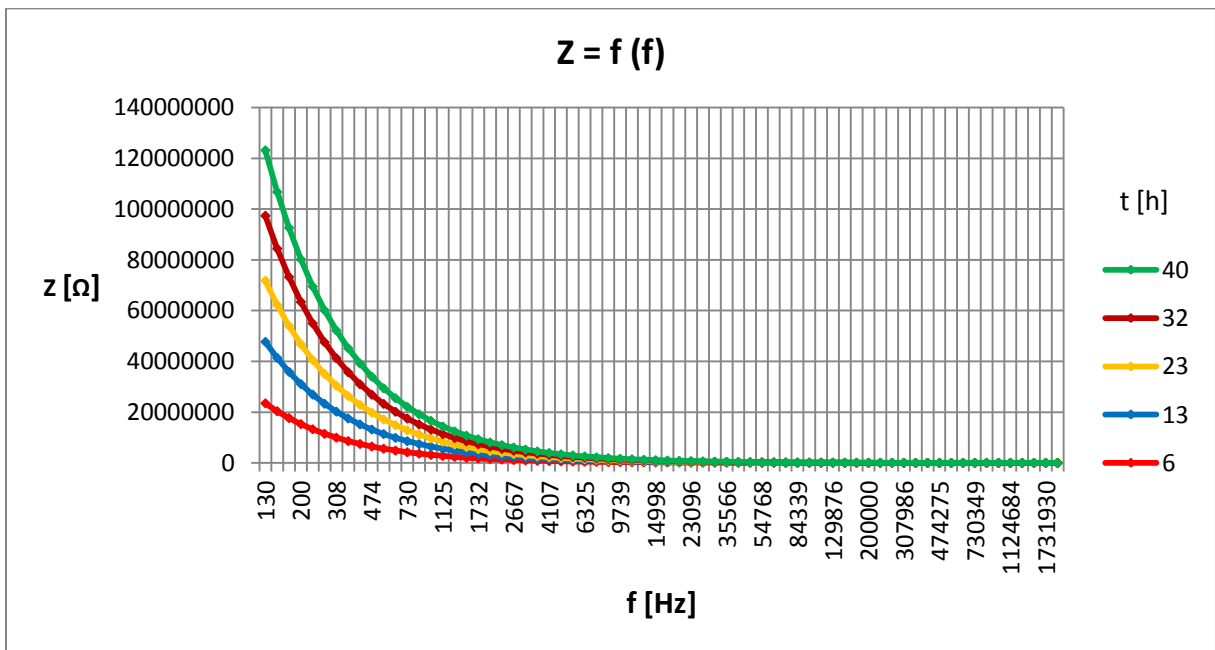
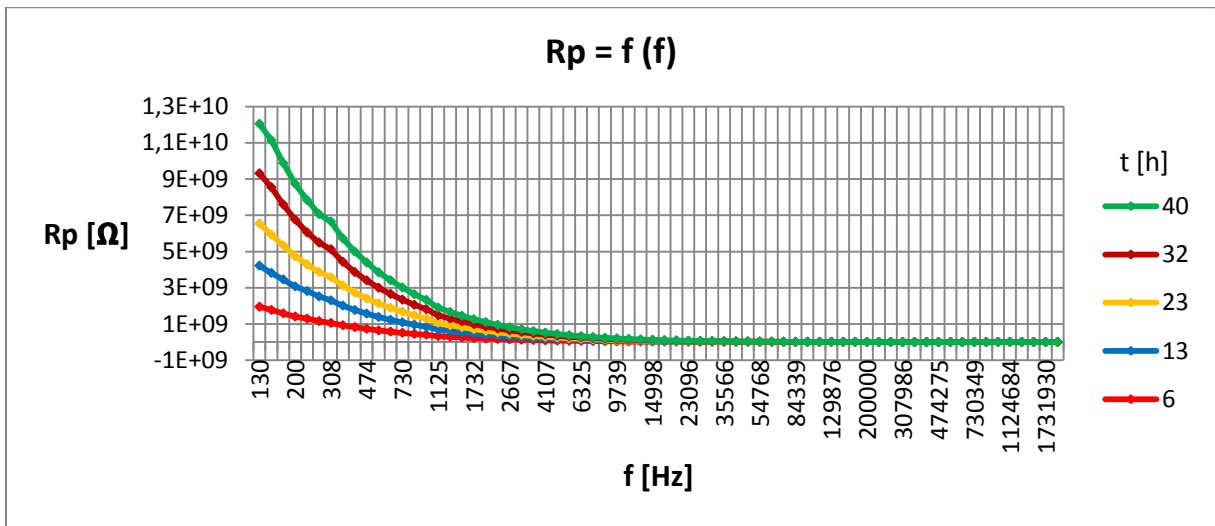
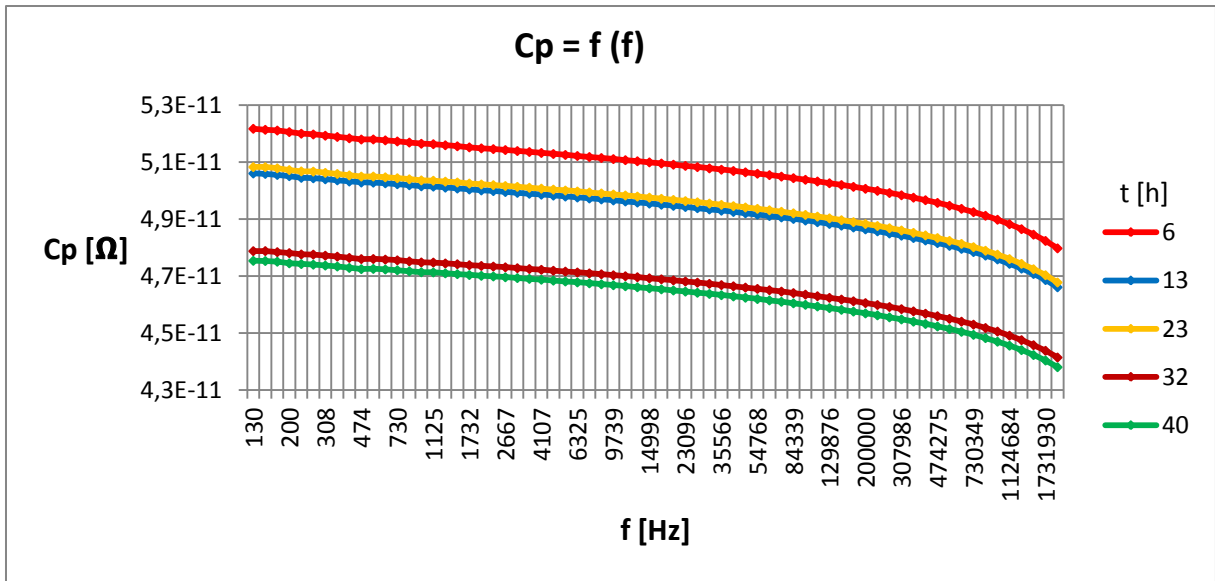


## Příloha 8

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=190\text{ °C}$	t=6 h (červená) t=13 h (modrá) t=23 h (oranžová) t=32 h (tmavě červená) t=40 h (zelená)

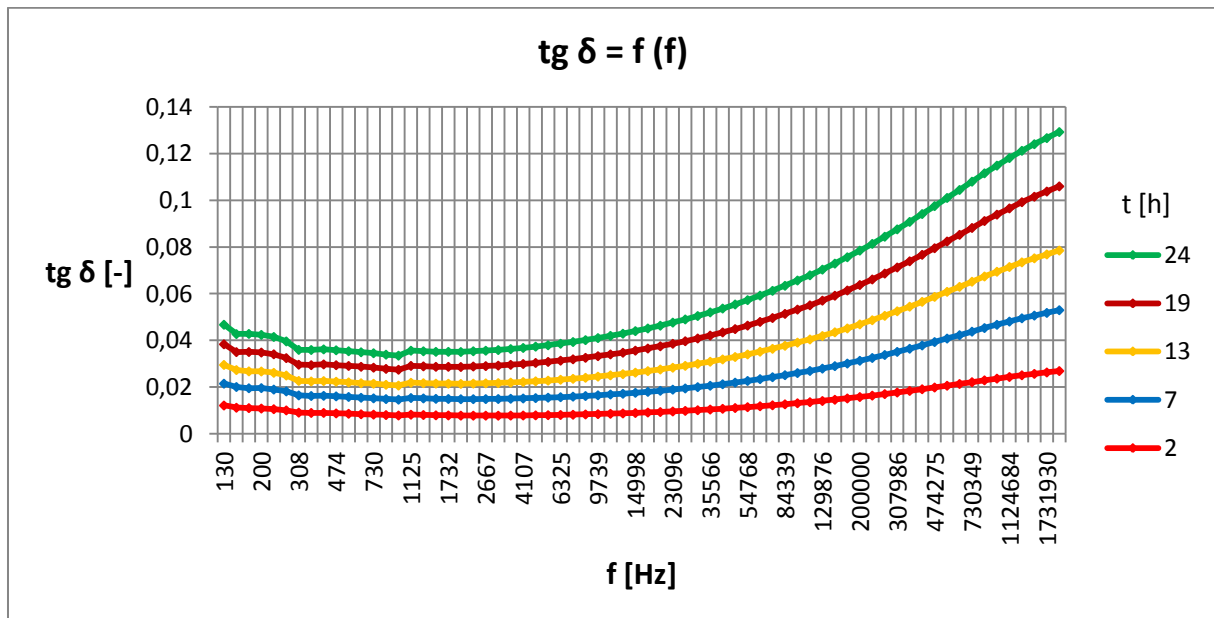
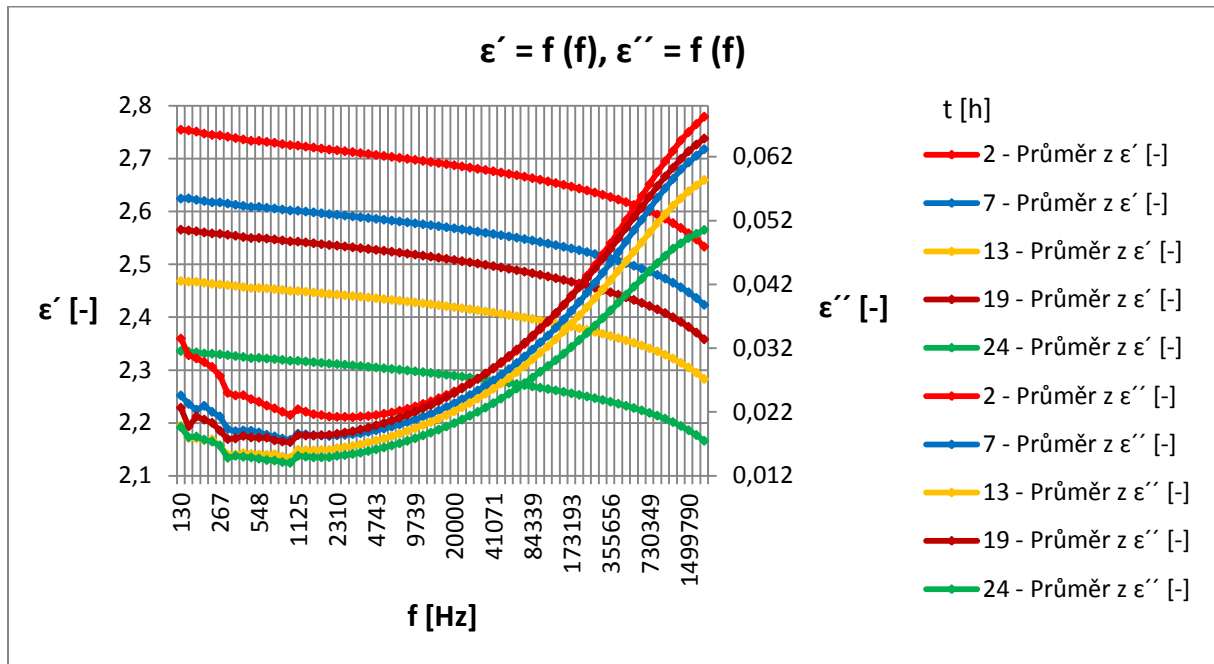


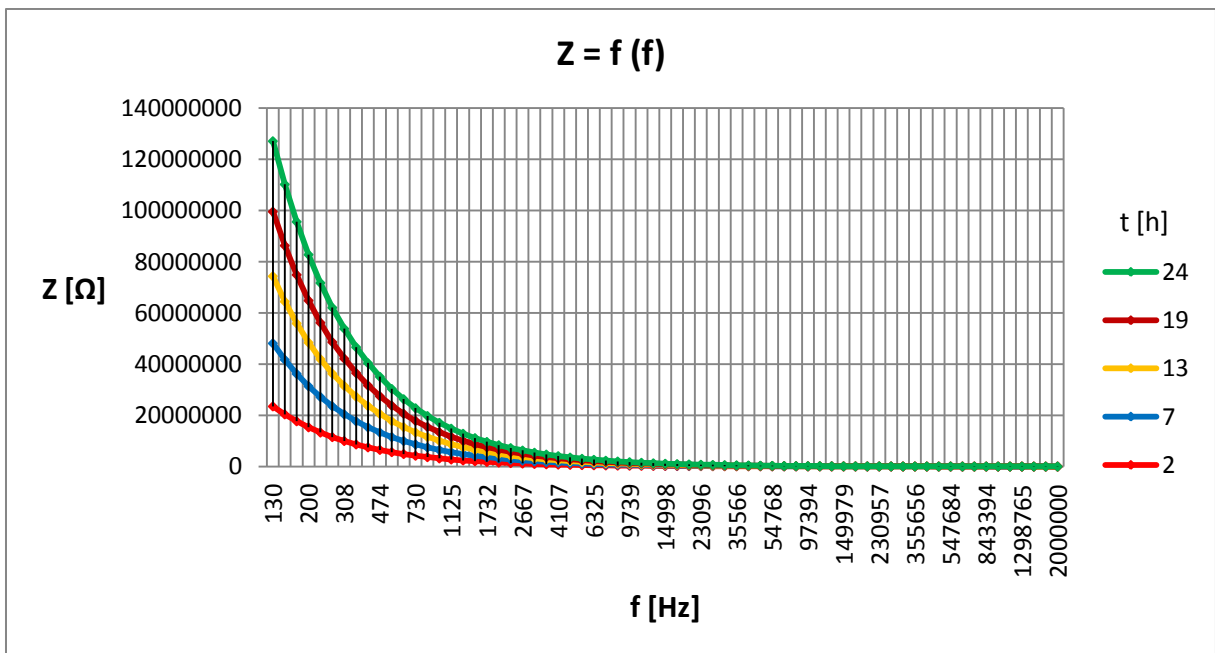
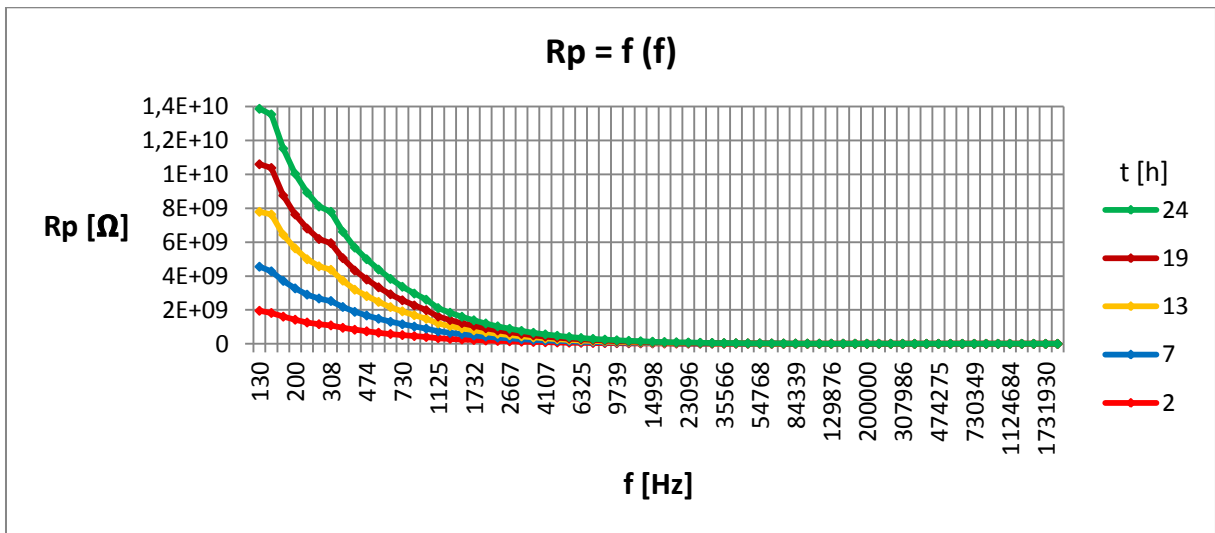
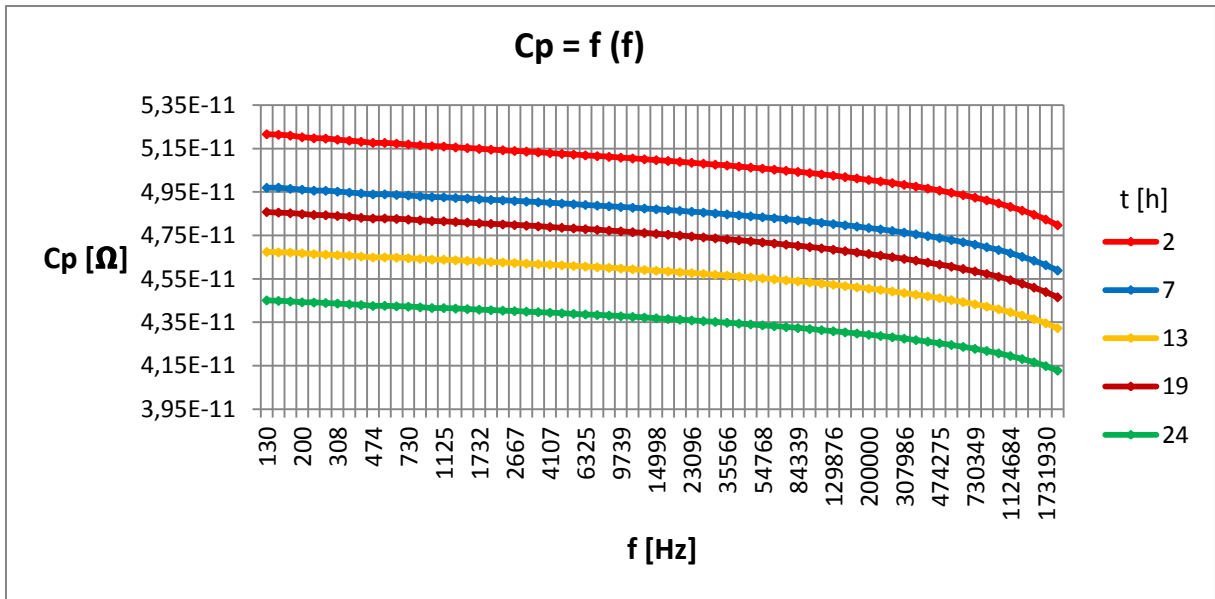




## Příloha 9

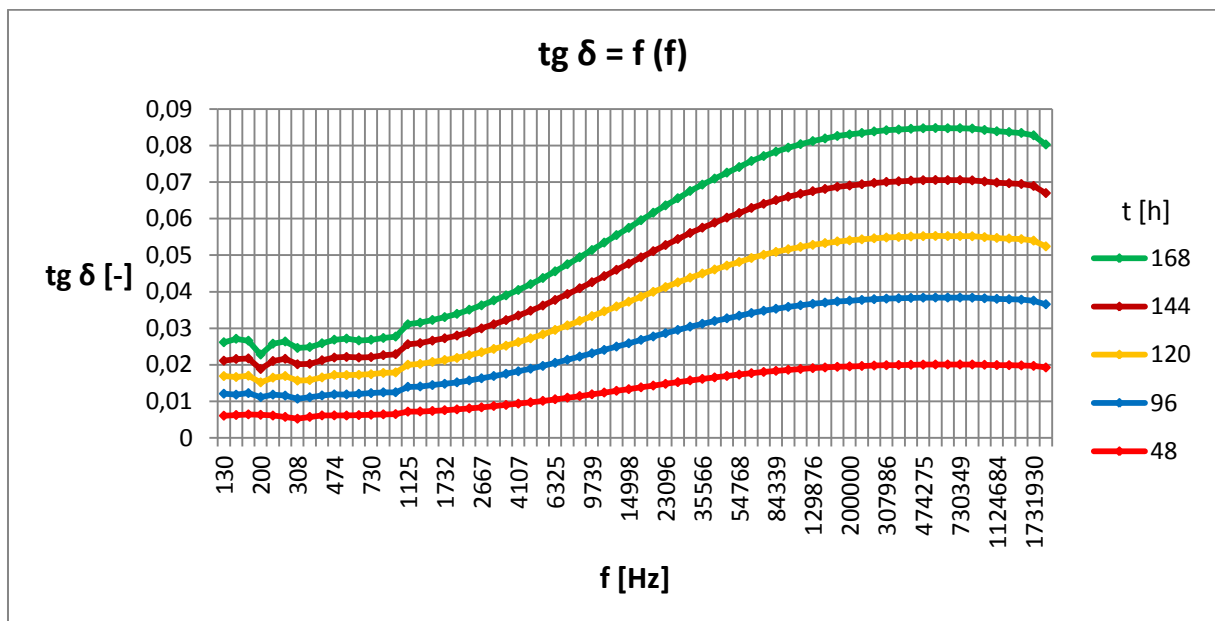
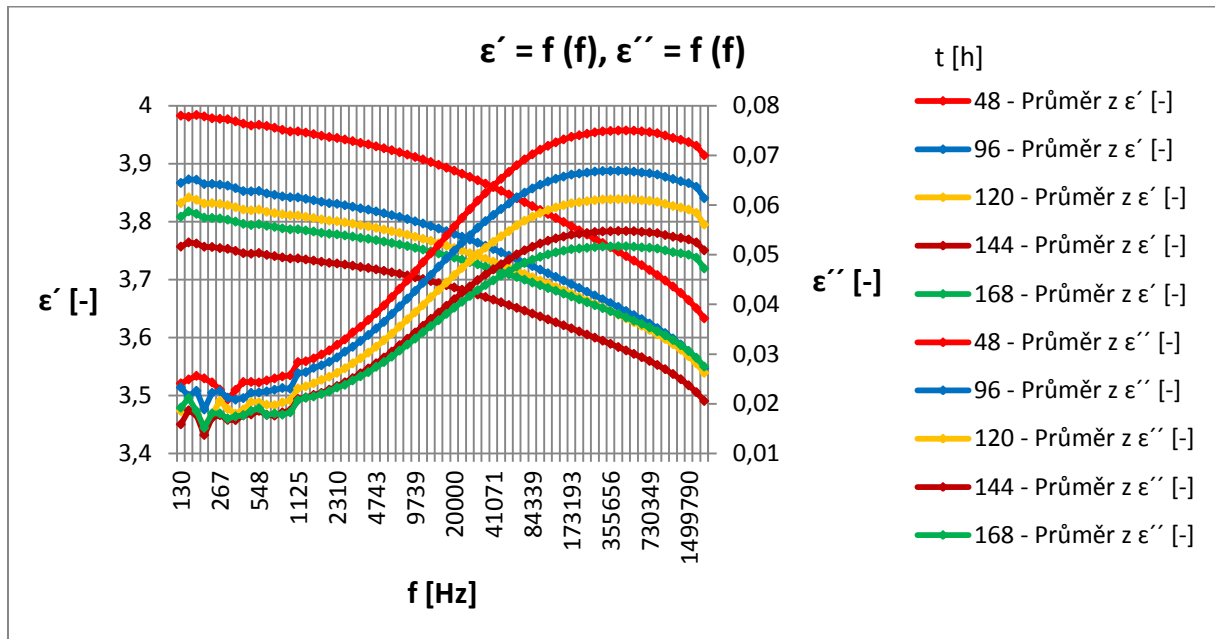
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
A	$\vartheta=200\text{ °C}$	t=2 h (červená) t=7 h (modrá) t=13 h (oranžová) t=19 h (tmavě červená) t=24 h (zelená)

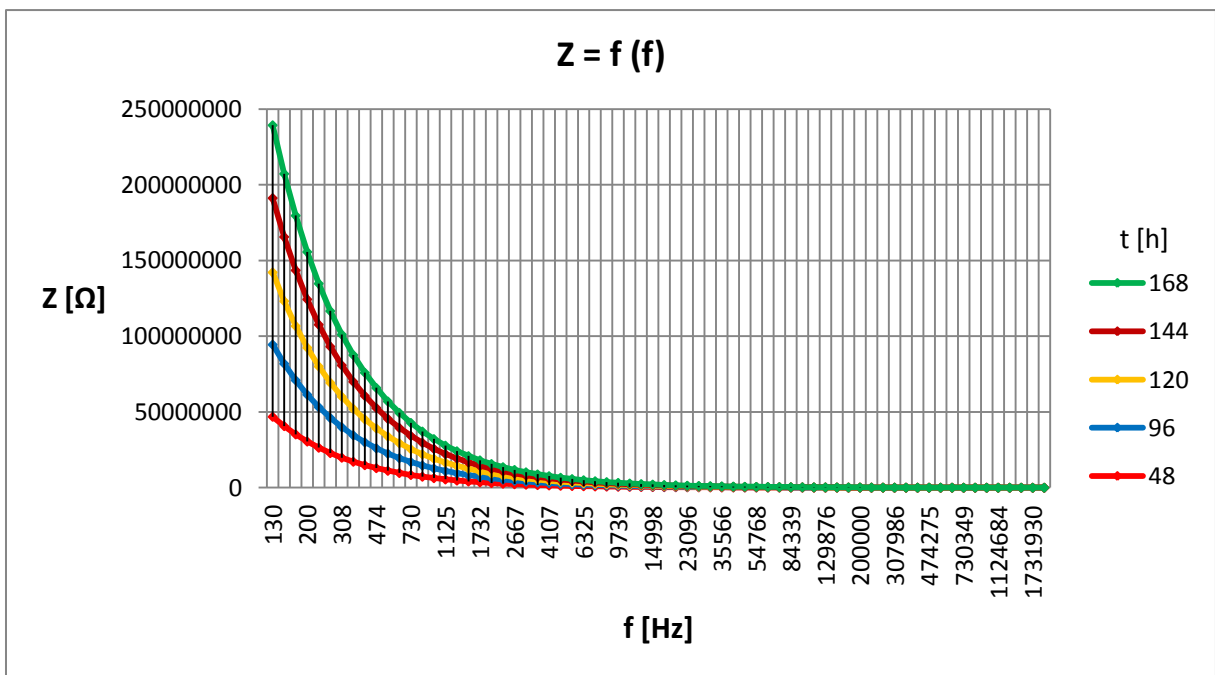
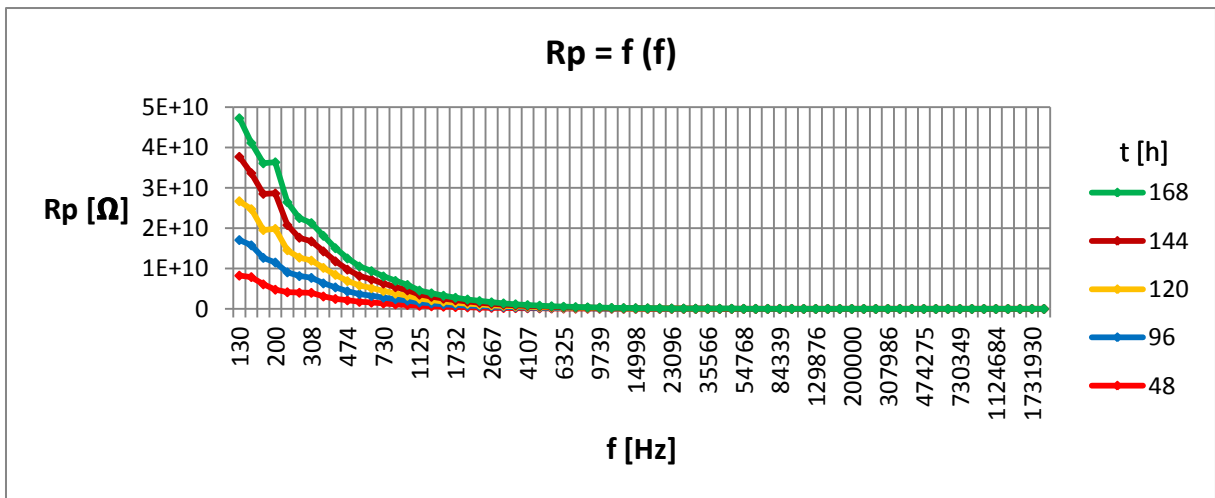
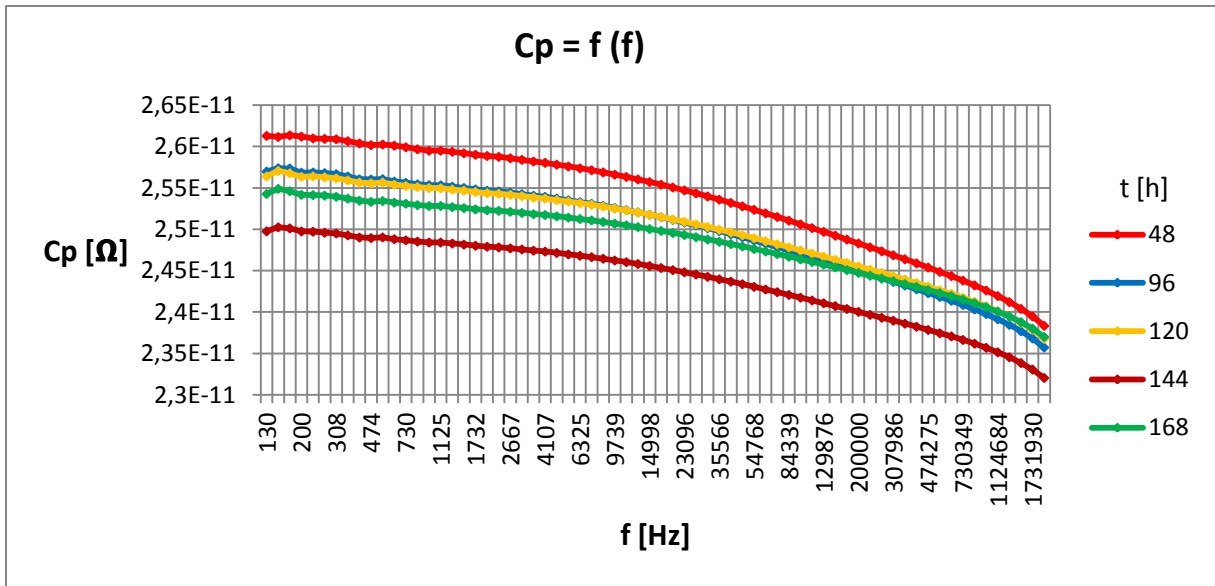




Příloha 10

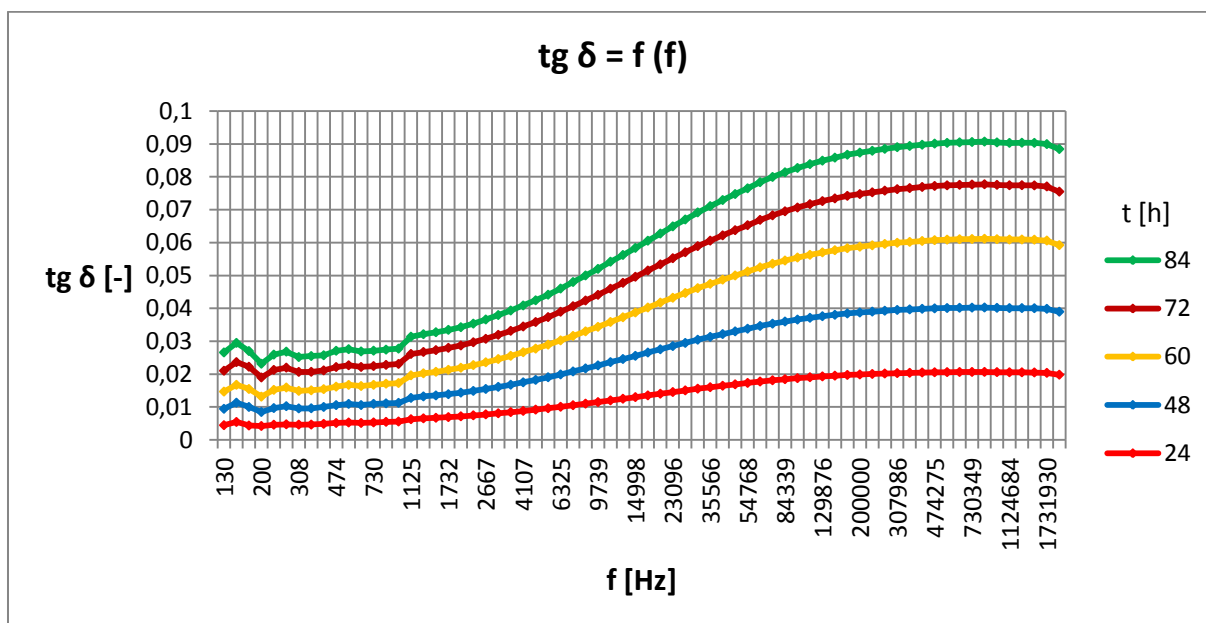
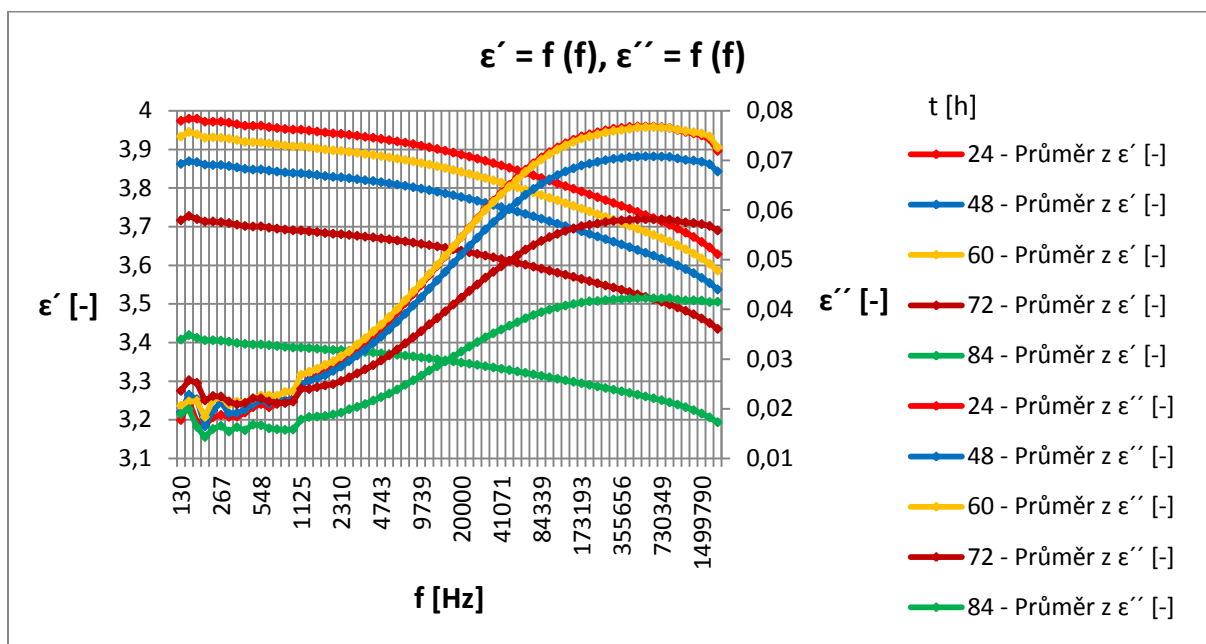
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=180\text{ °C}$	t=48 h (červená) t=96 h (modrá) t=120 h (oranžová) t=144 h (tmavě červená) t=168 h (zelená)

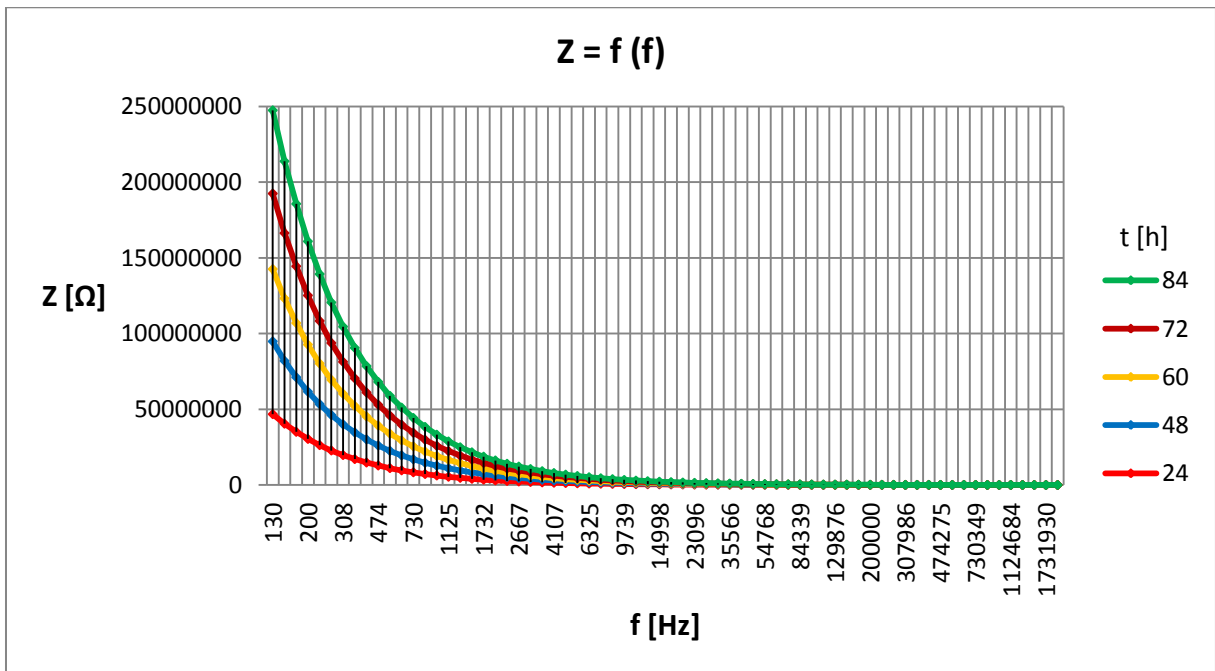
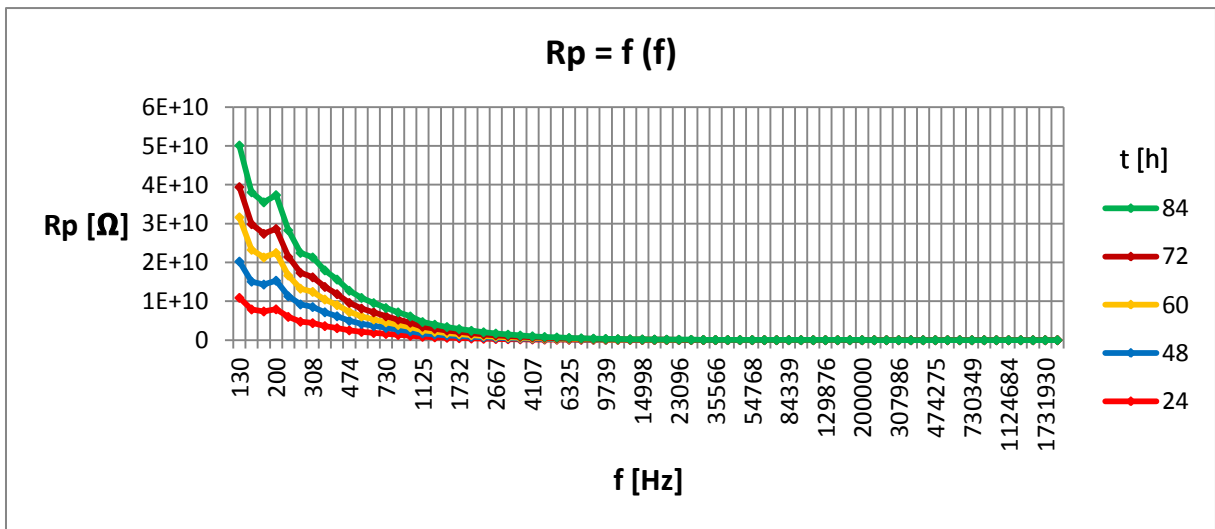
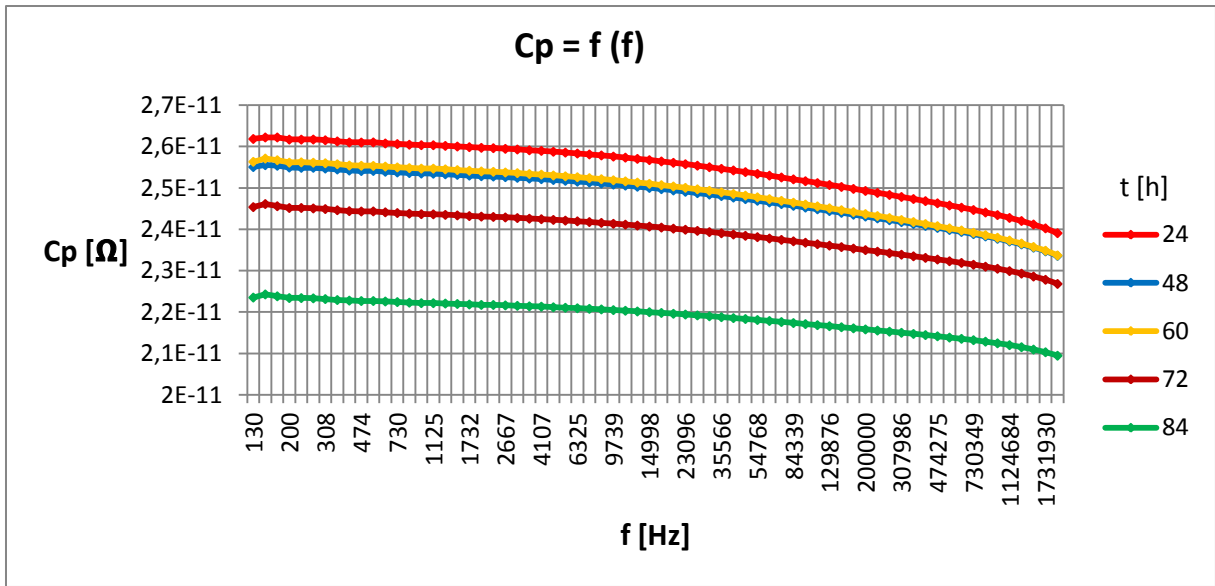




Příloha 11

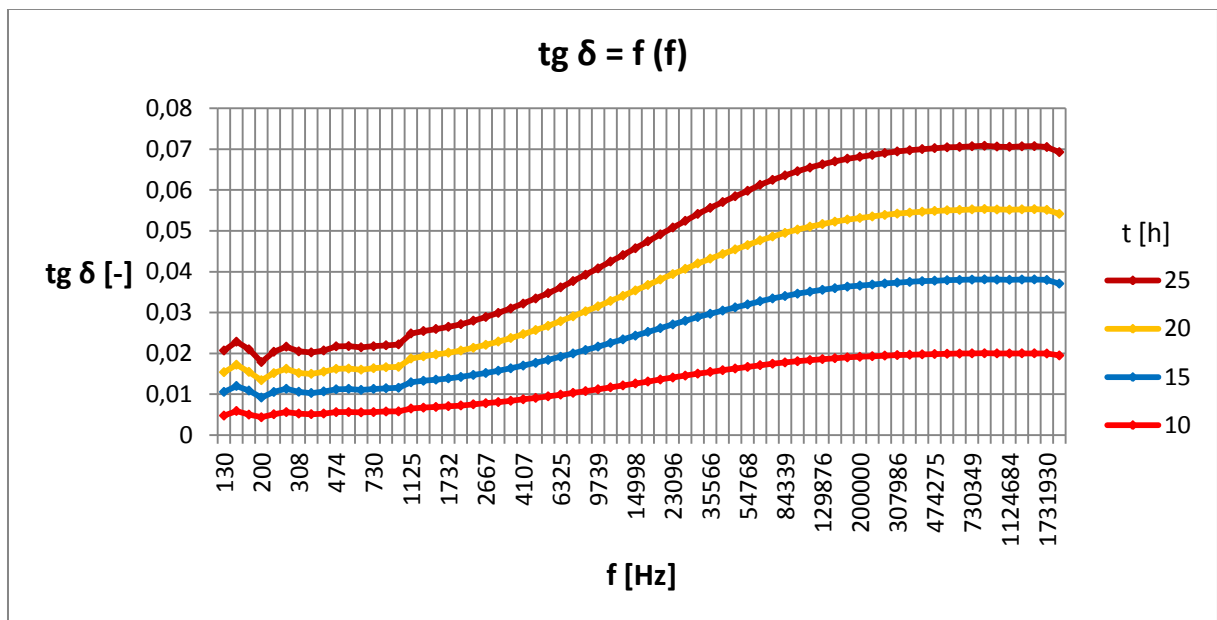
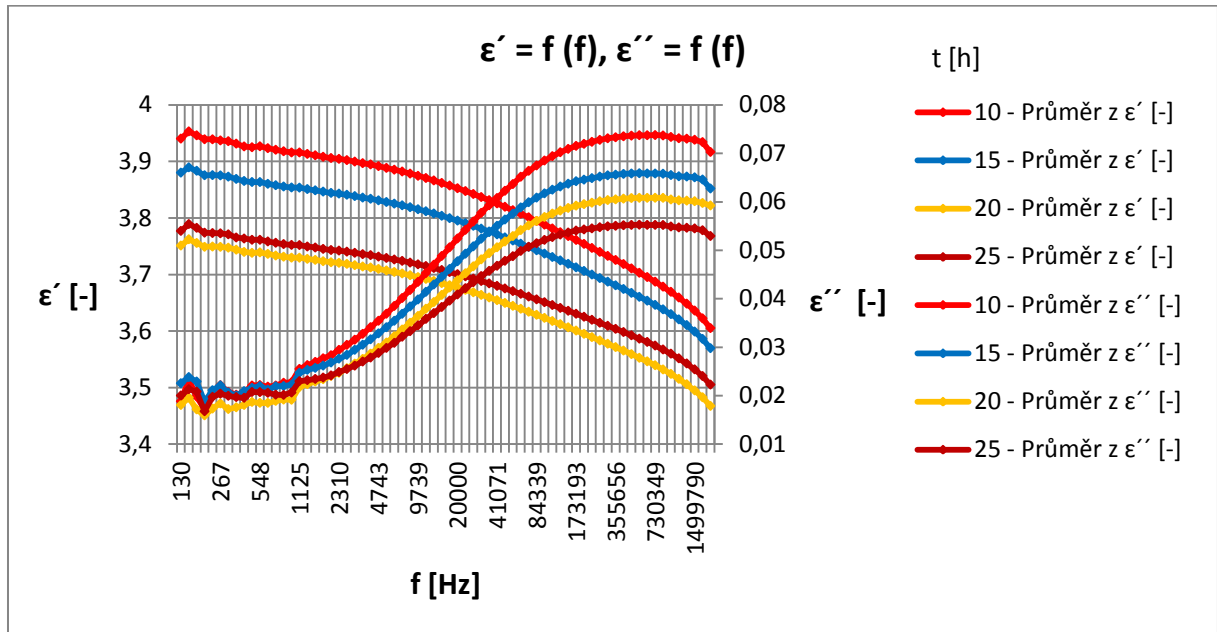
Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=190\text{ °C}$	t=24 h (červená) t=48 h (modrá) t=60 h (oranžová) t=72 h (tmavě červená) t=84 h (zelená)



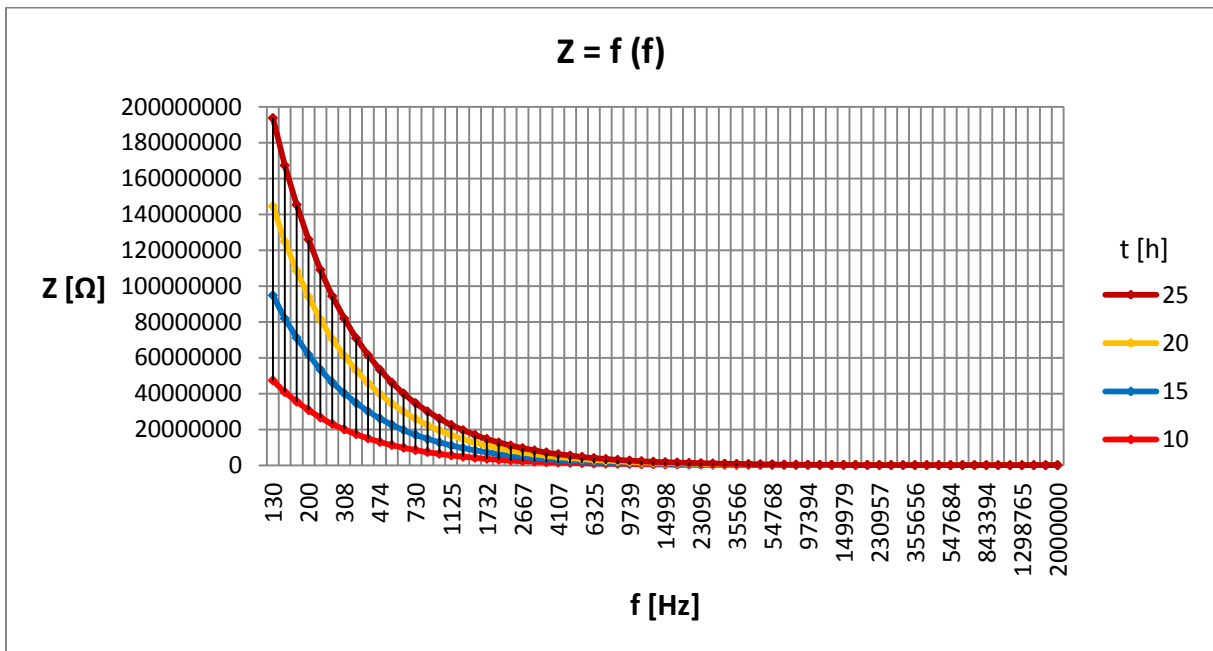
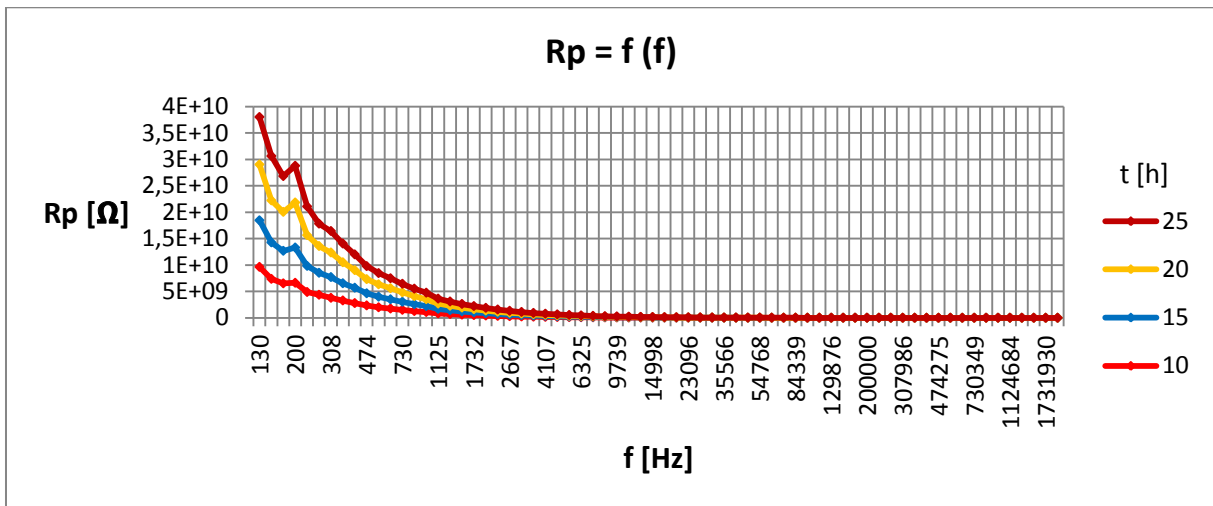
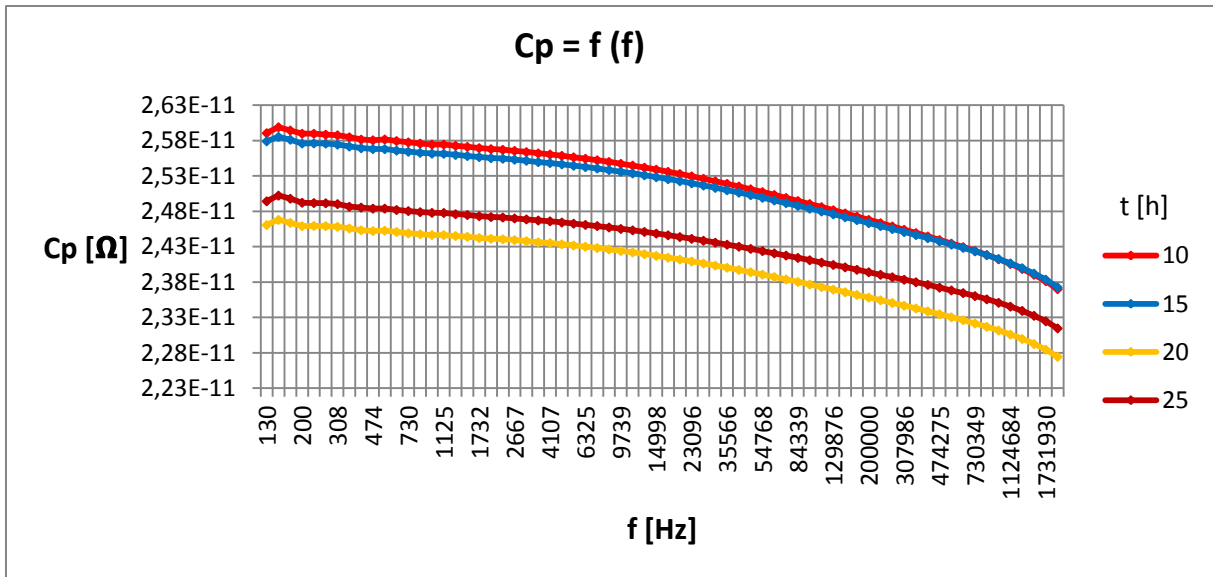


Příloha 12

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Doba stárnutí [hodin]
B	$\vartheta=200\text{ °C}$	t=10 h (červená) t=15 h (modrá) t=20 h (oranžová) t=25 h (tmavě červená)

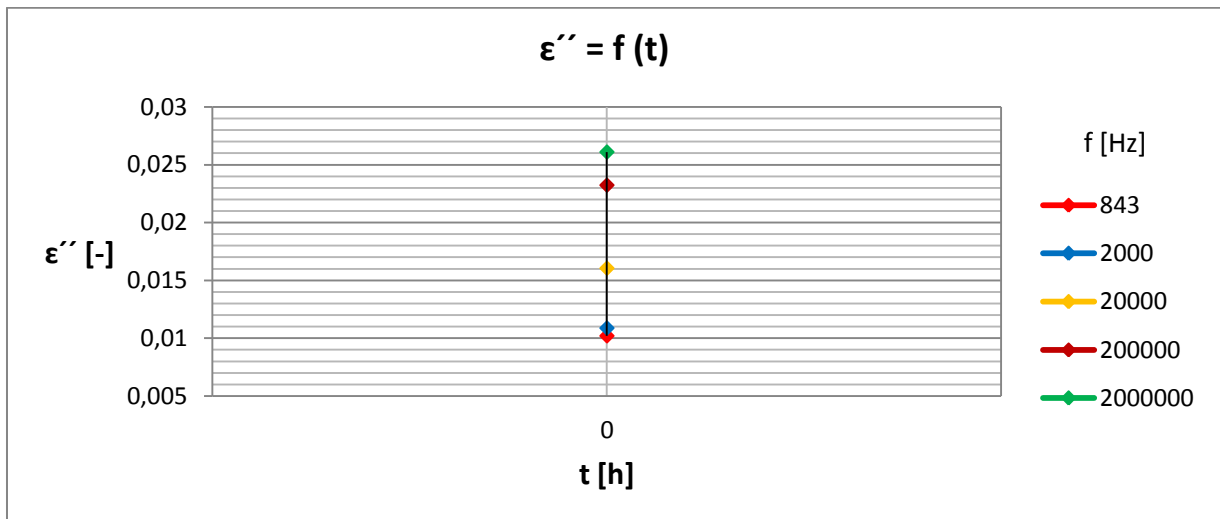
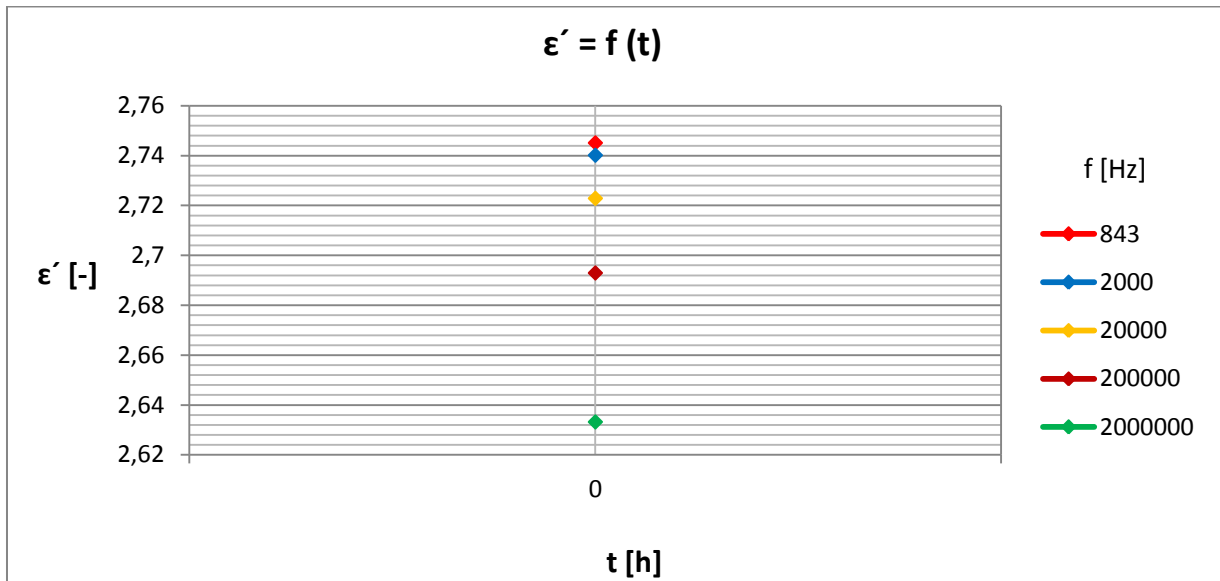


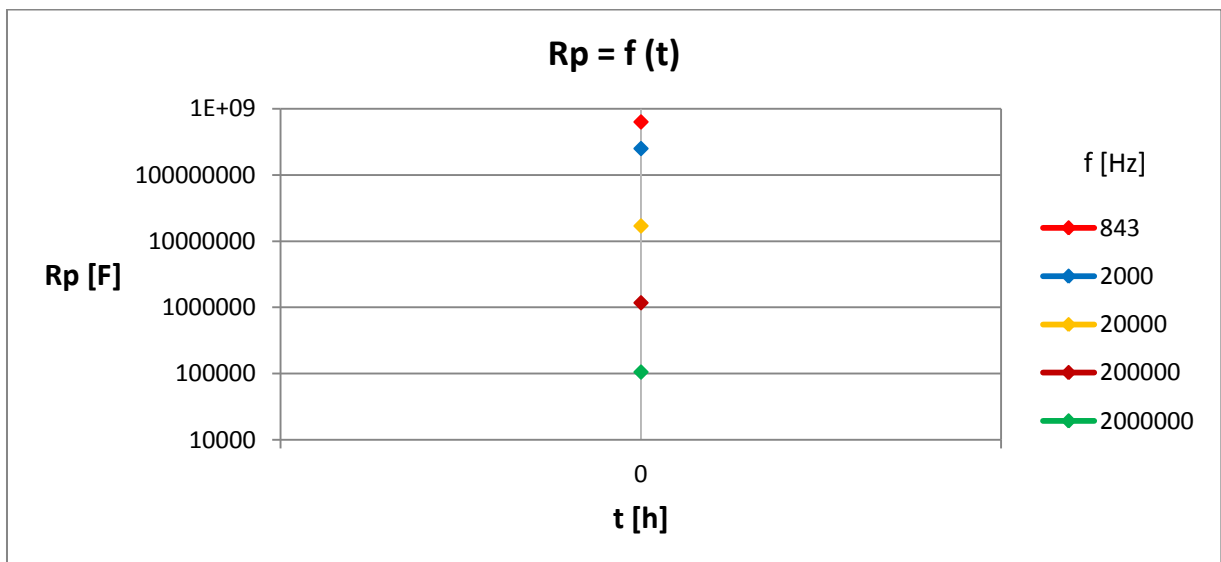
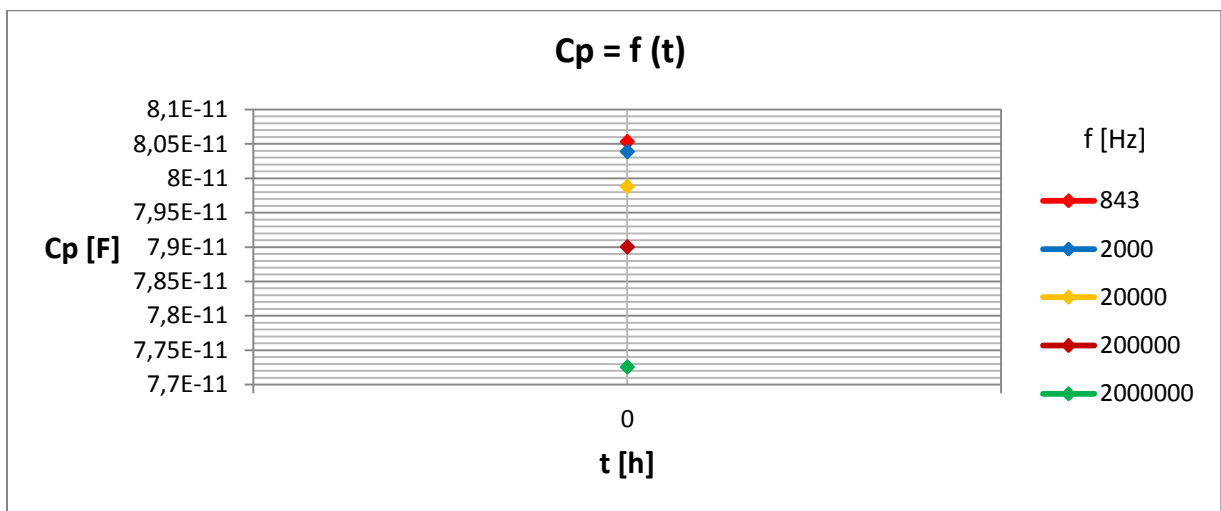
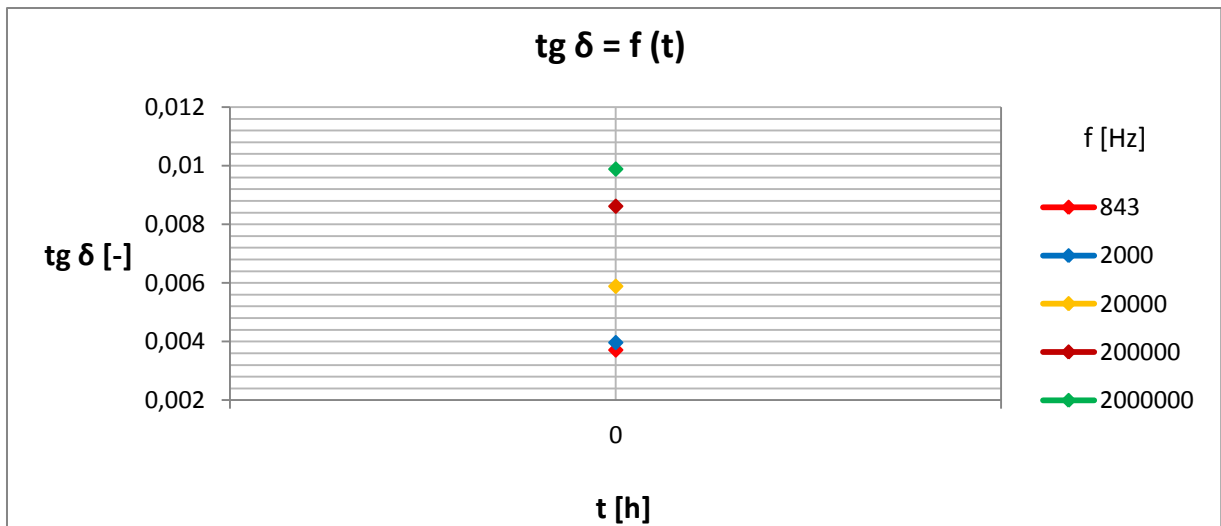


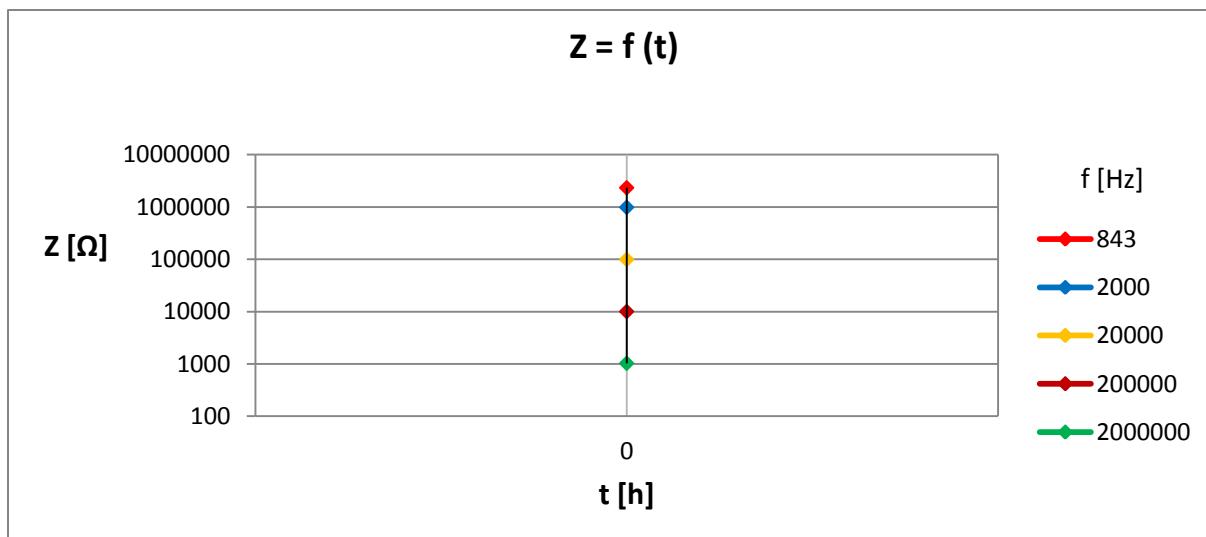


### Příloha 13

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=20\text{ °C}$ (dodaný stav)	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

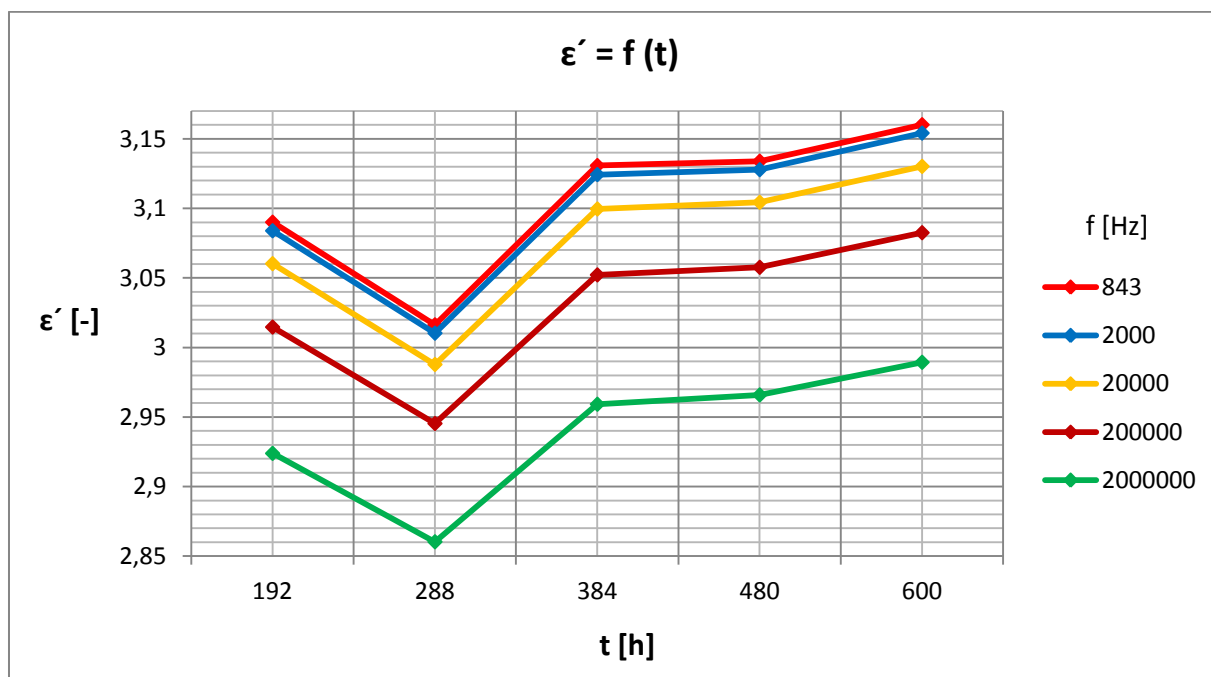


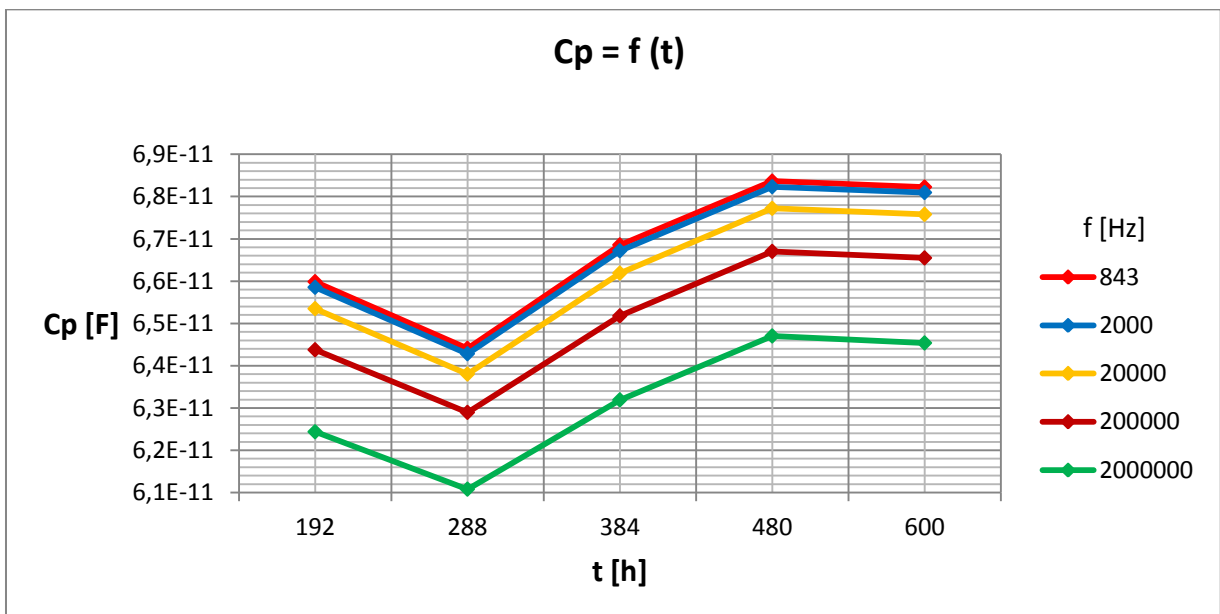
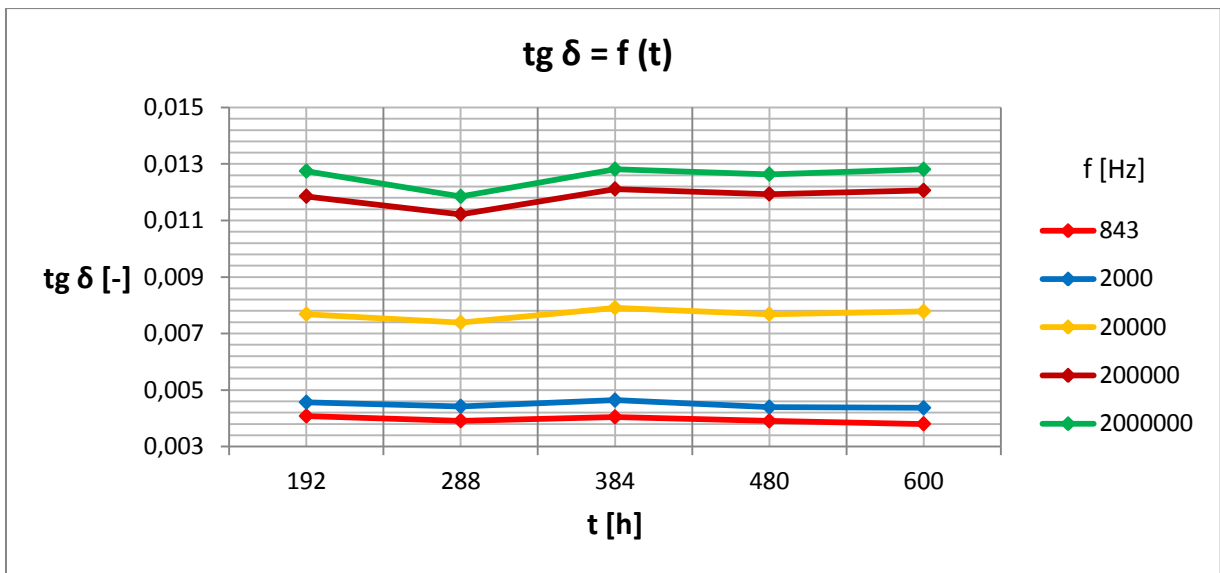
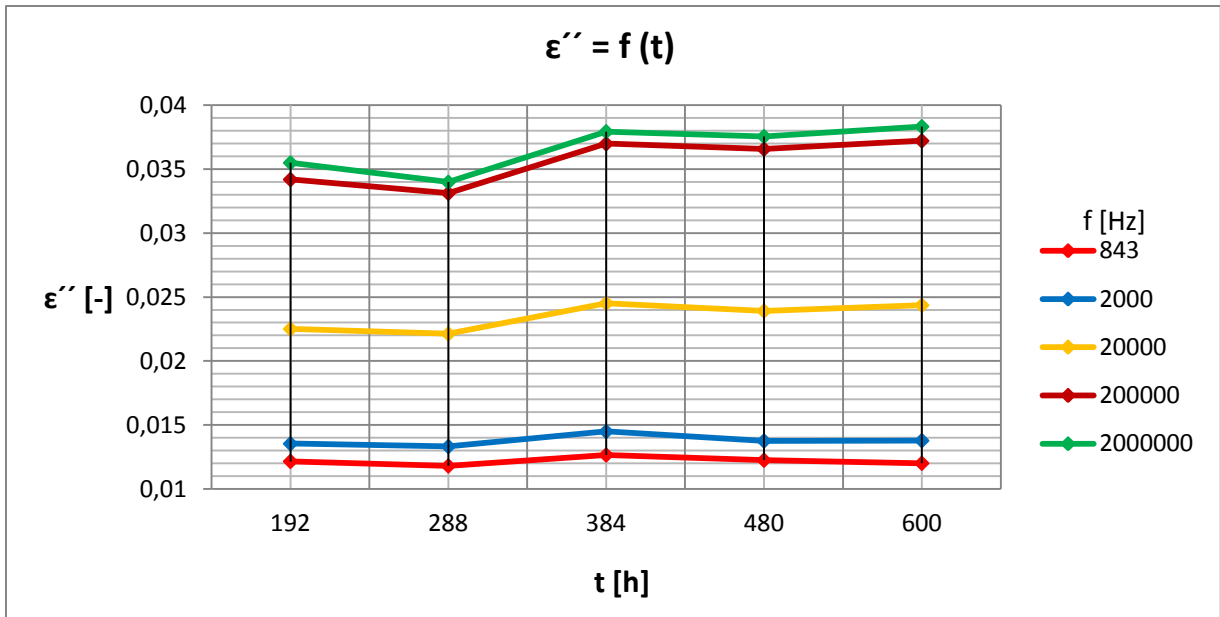


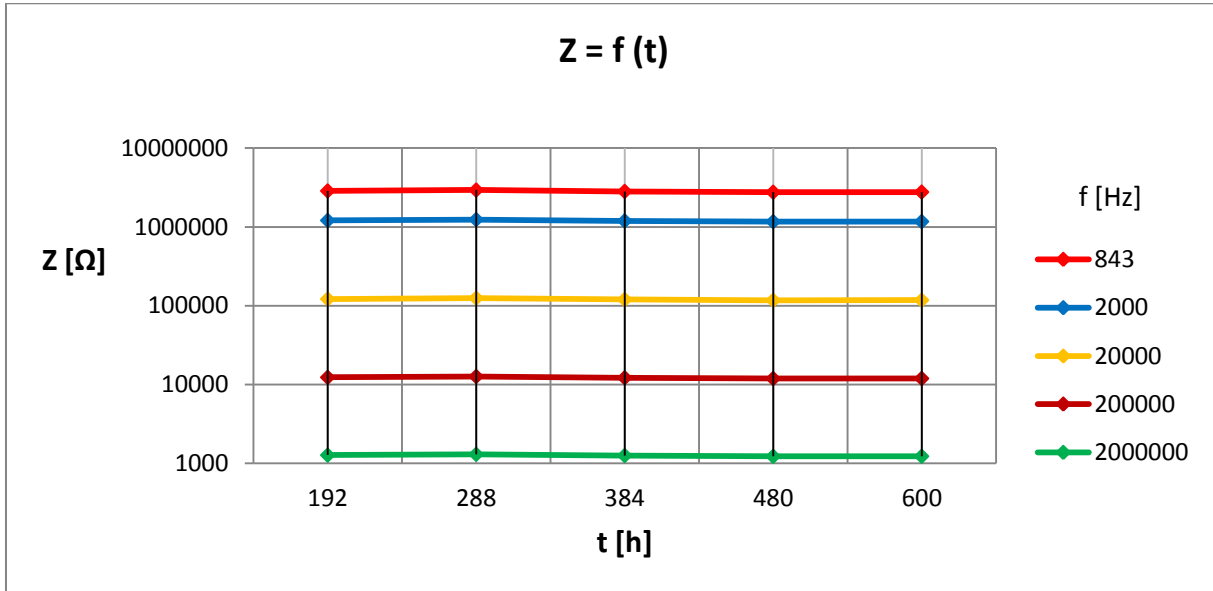
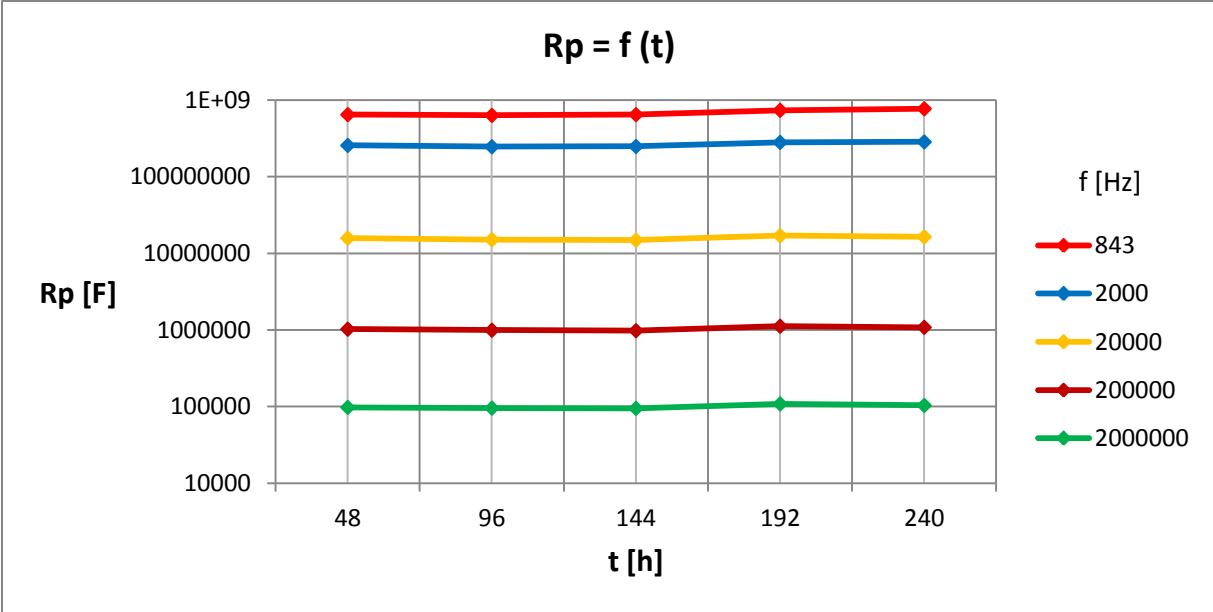


### Příloha 14

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=170\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

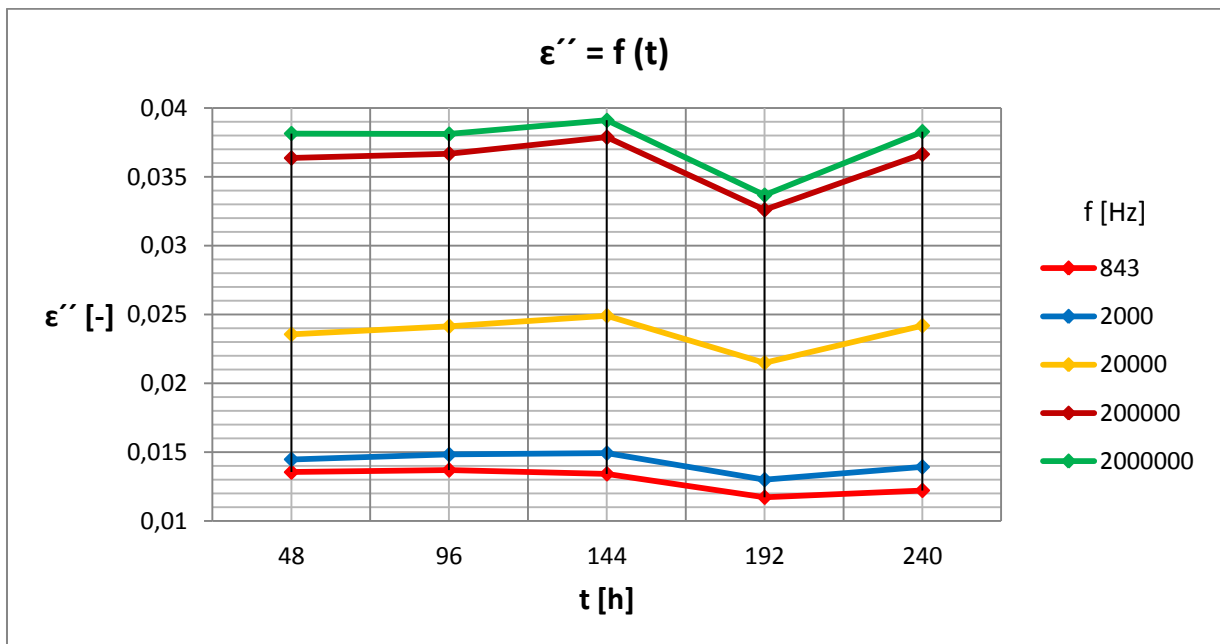
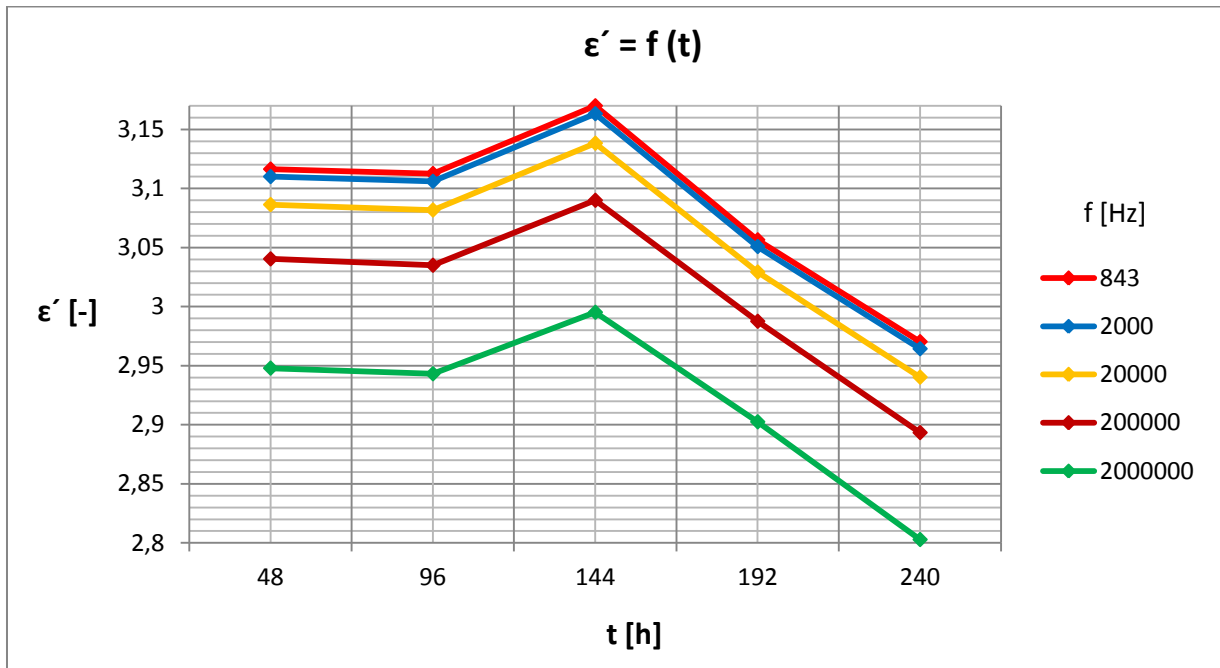


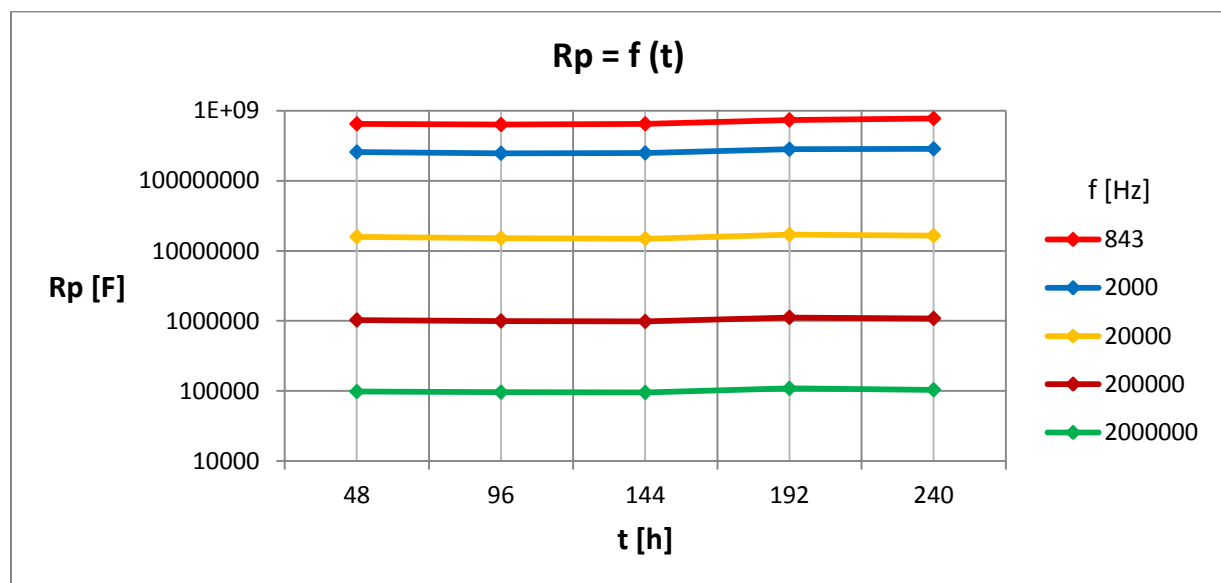
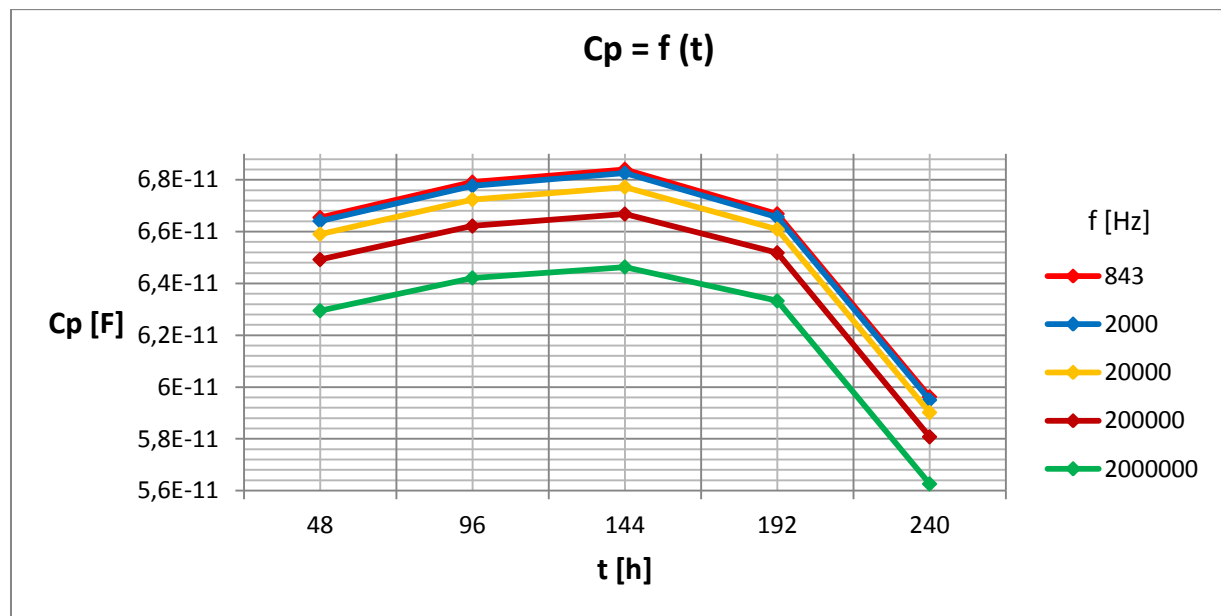
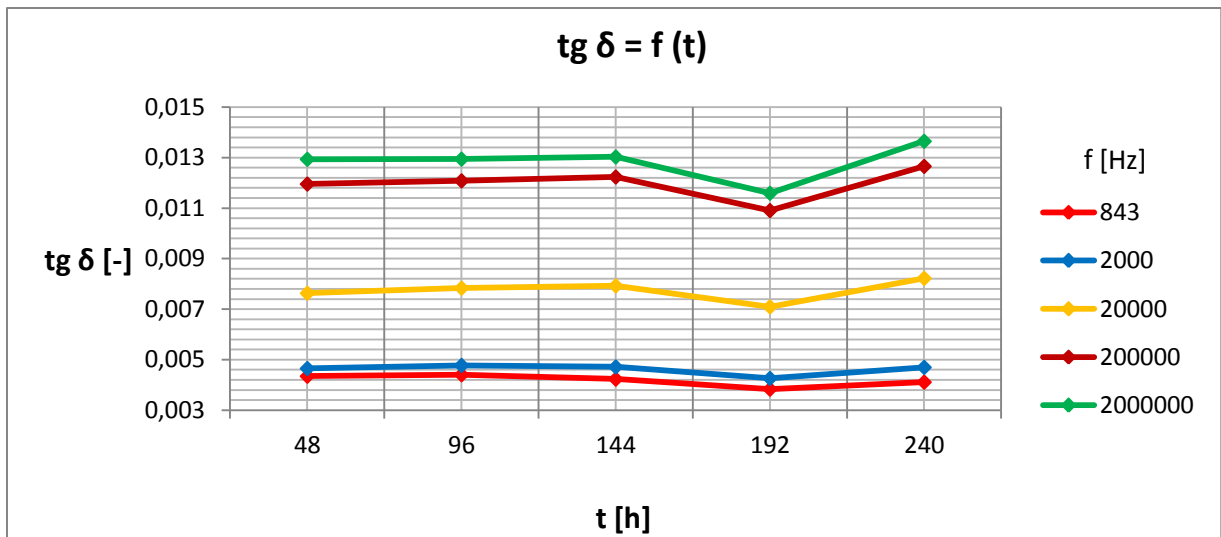




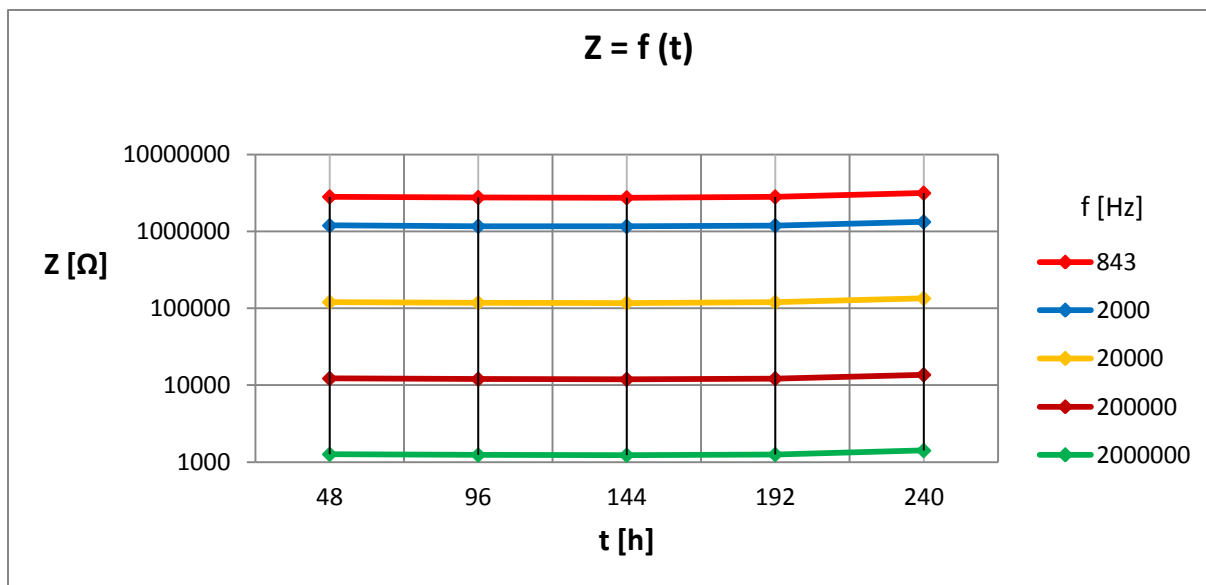
Příloha 15

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=175\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)



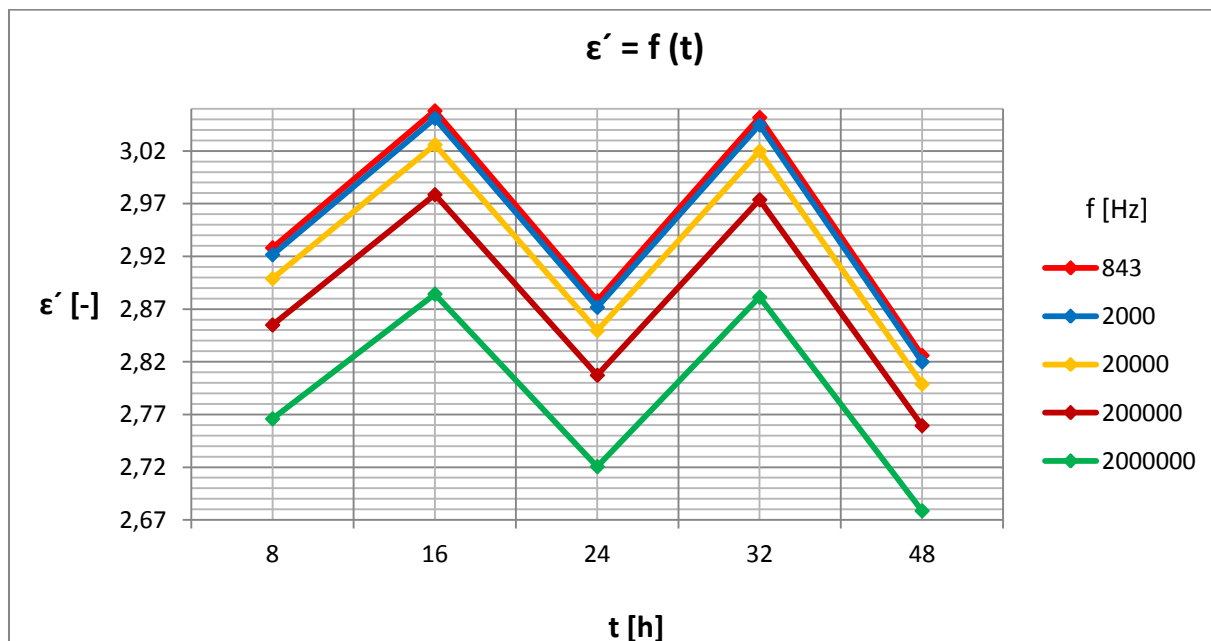


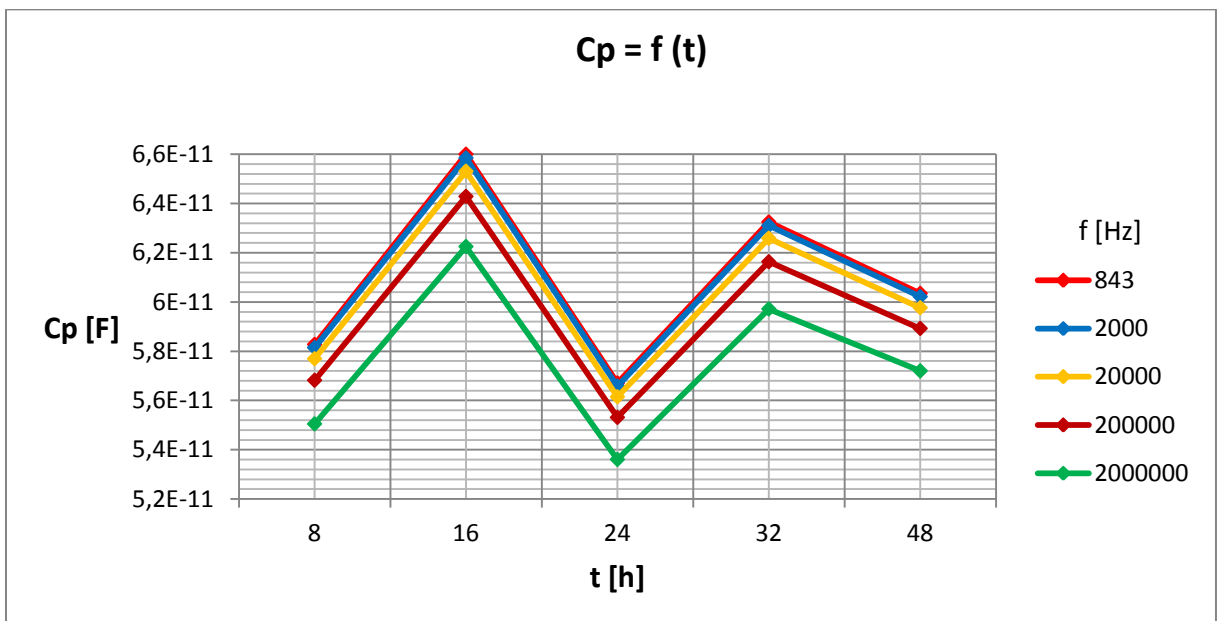
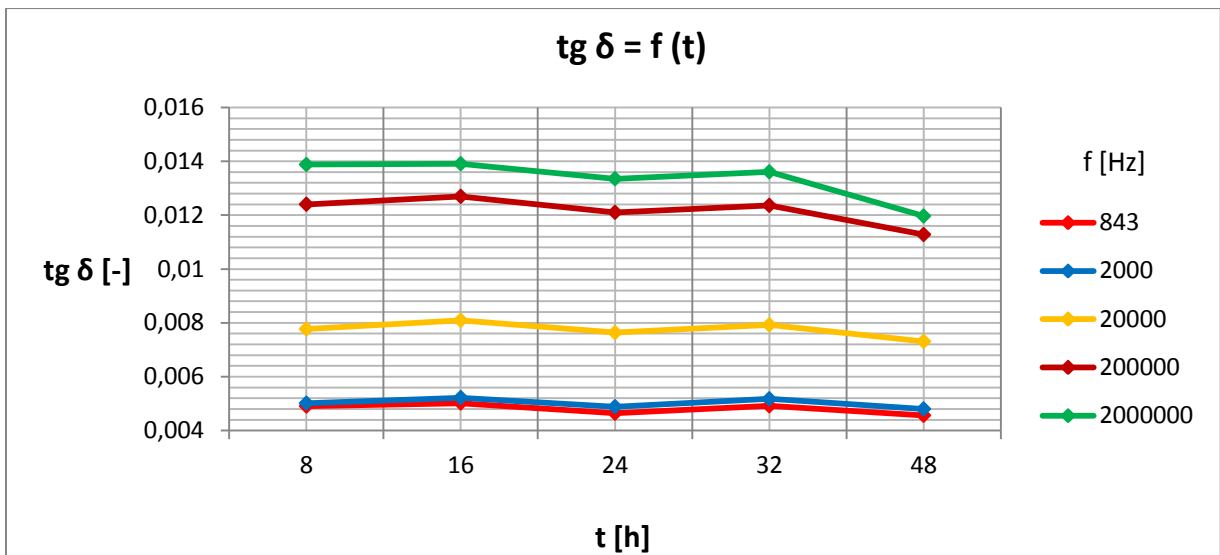
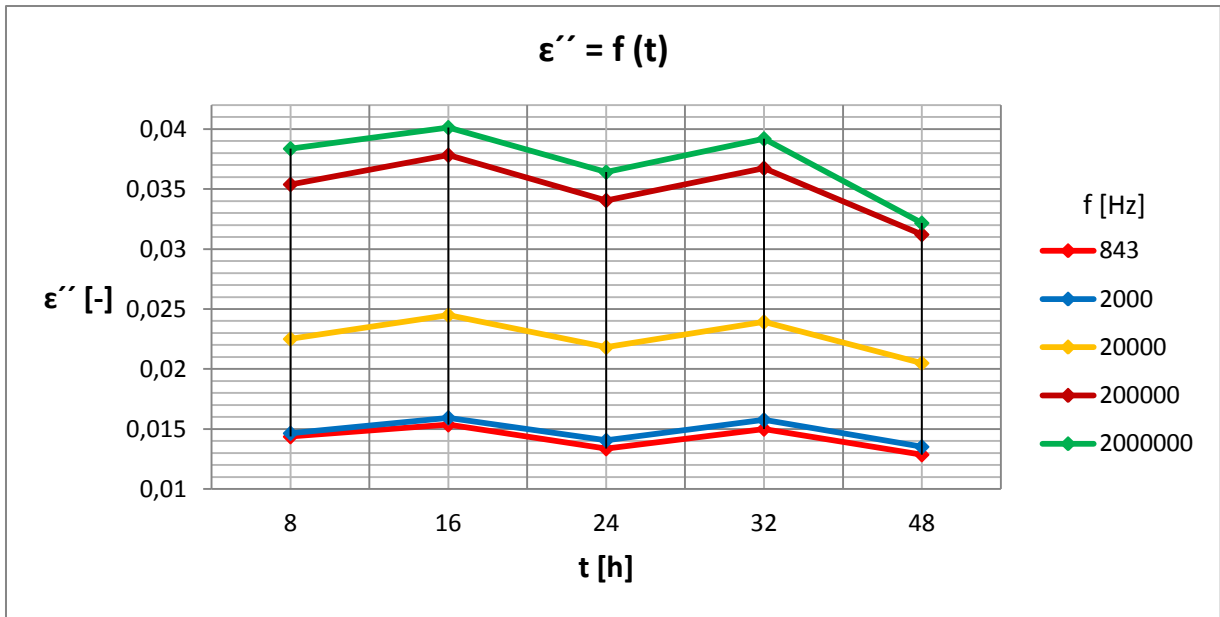


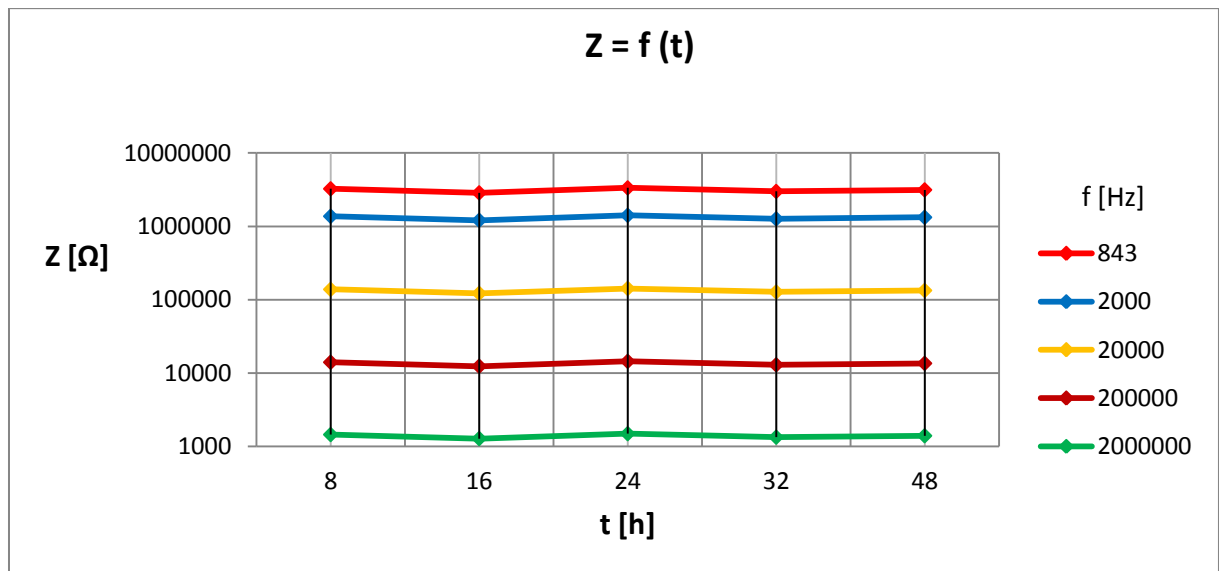
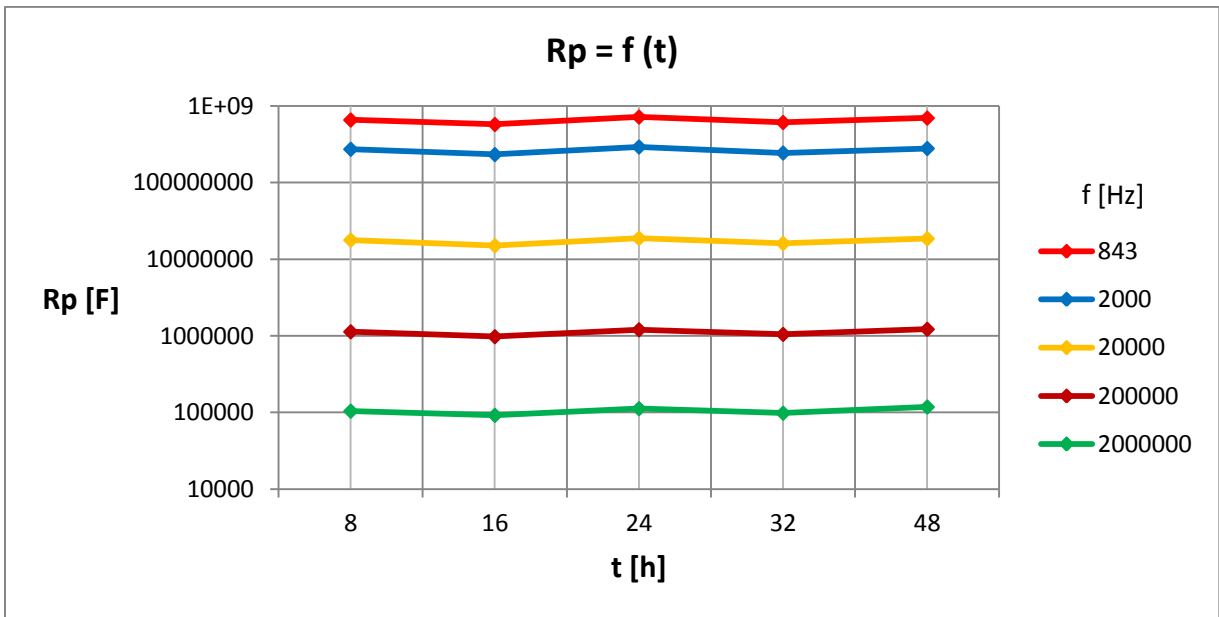


### Příloha 16

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta = 180\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

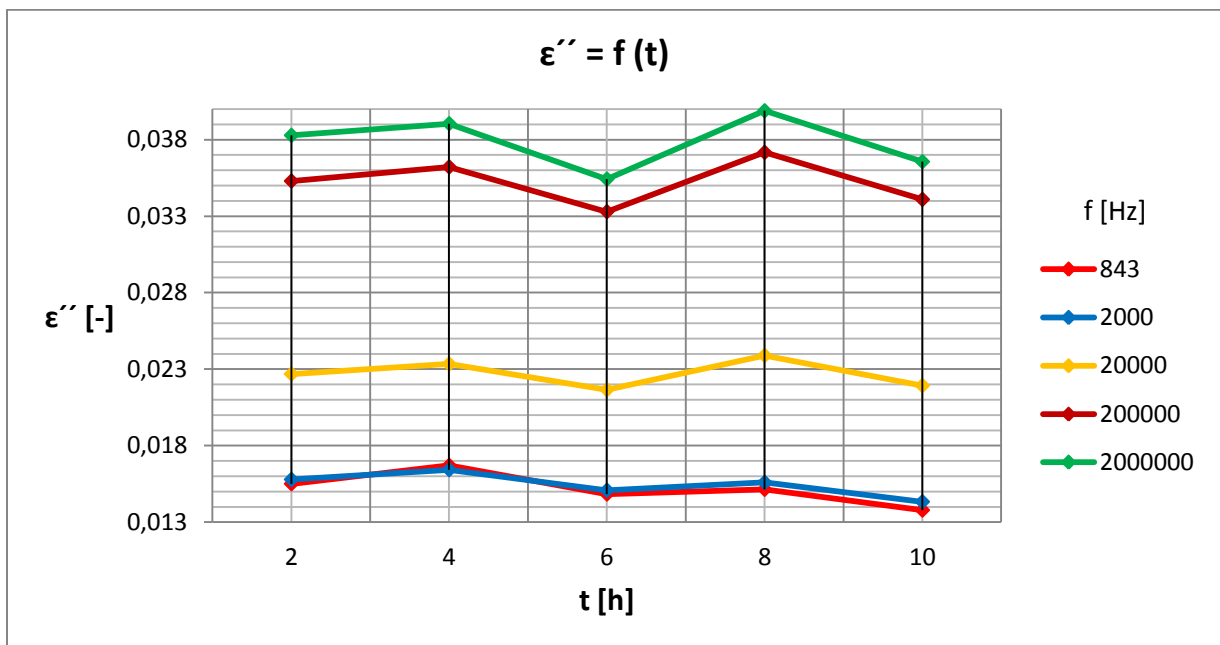
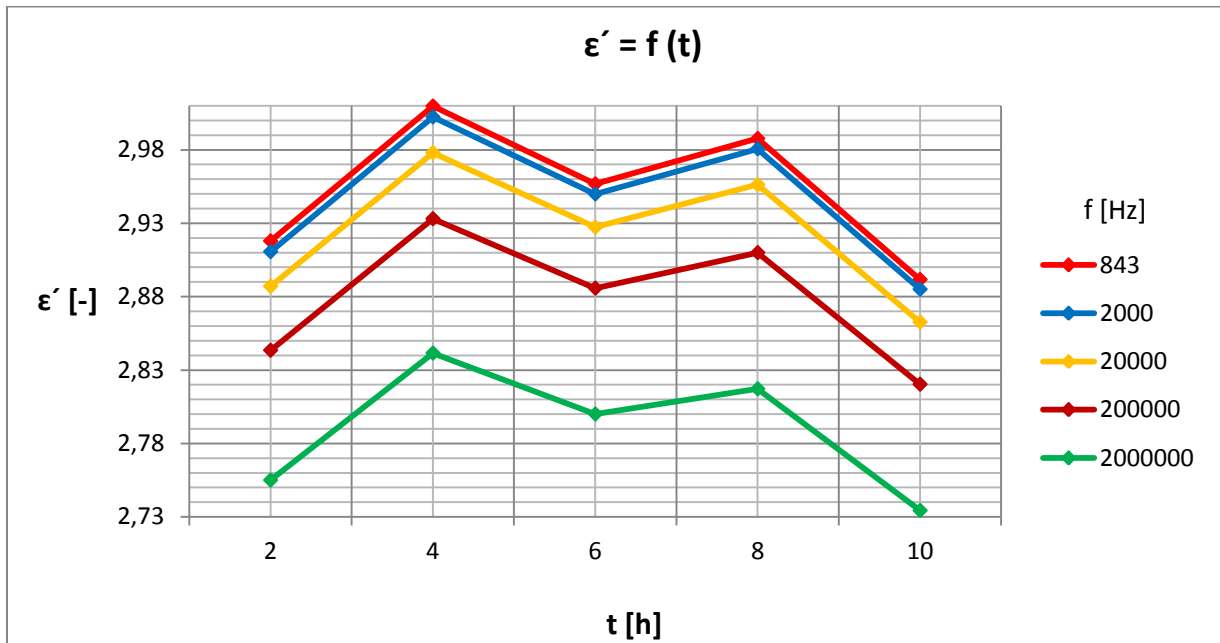


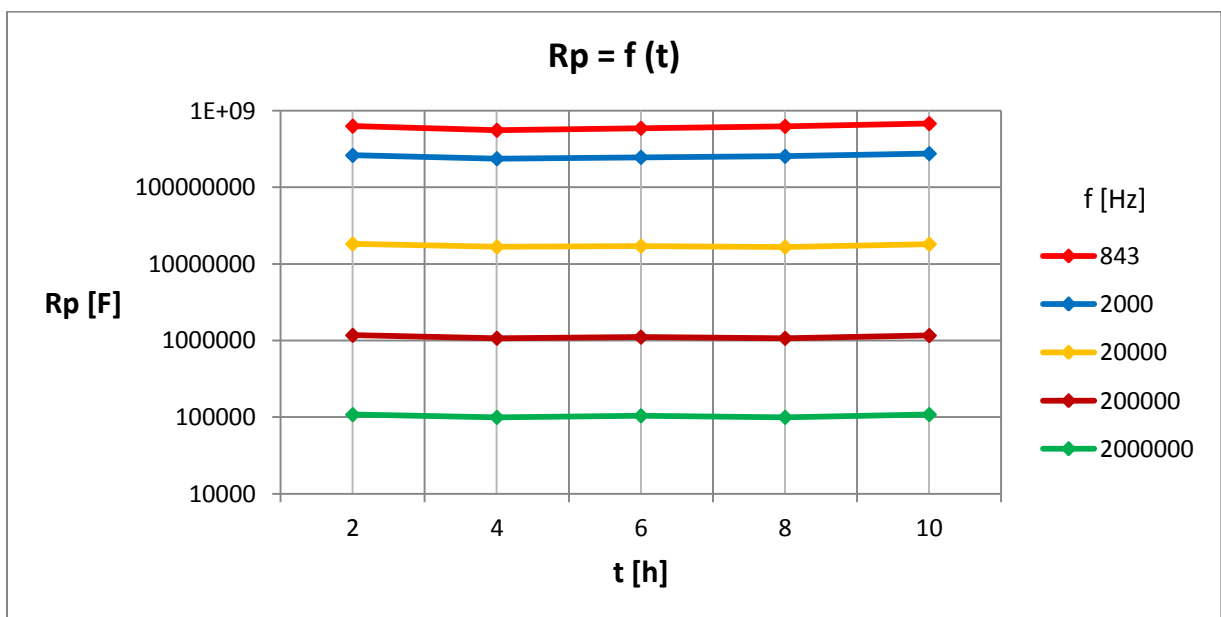
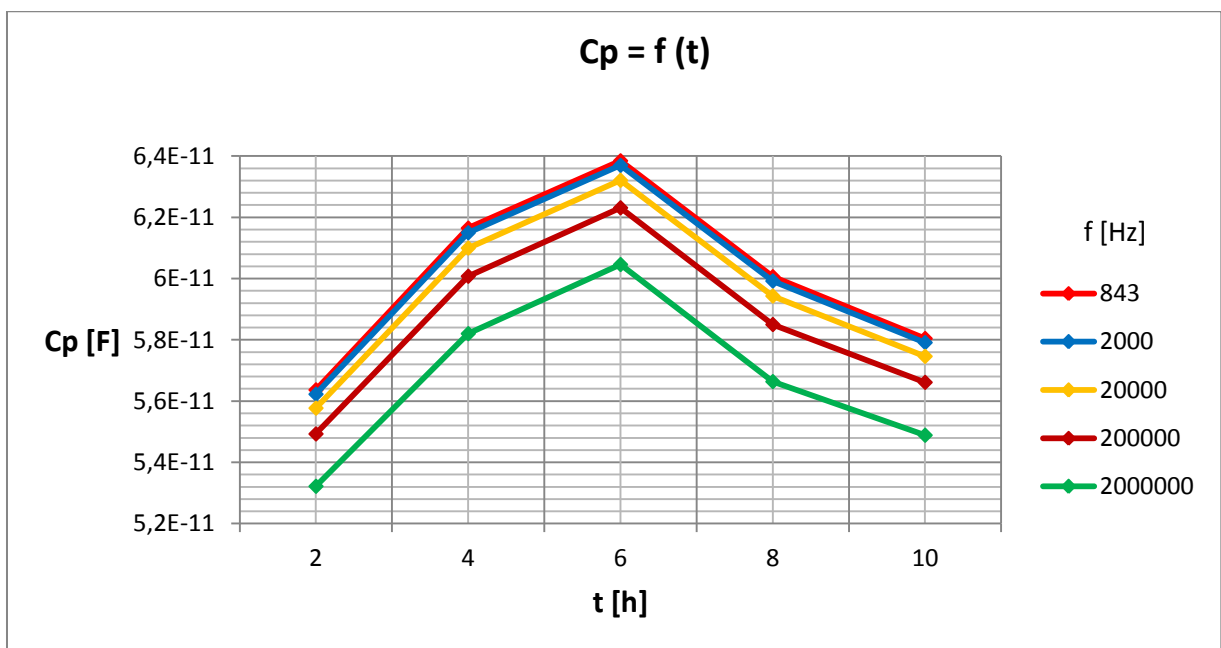
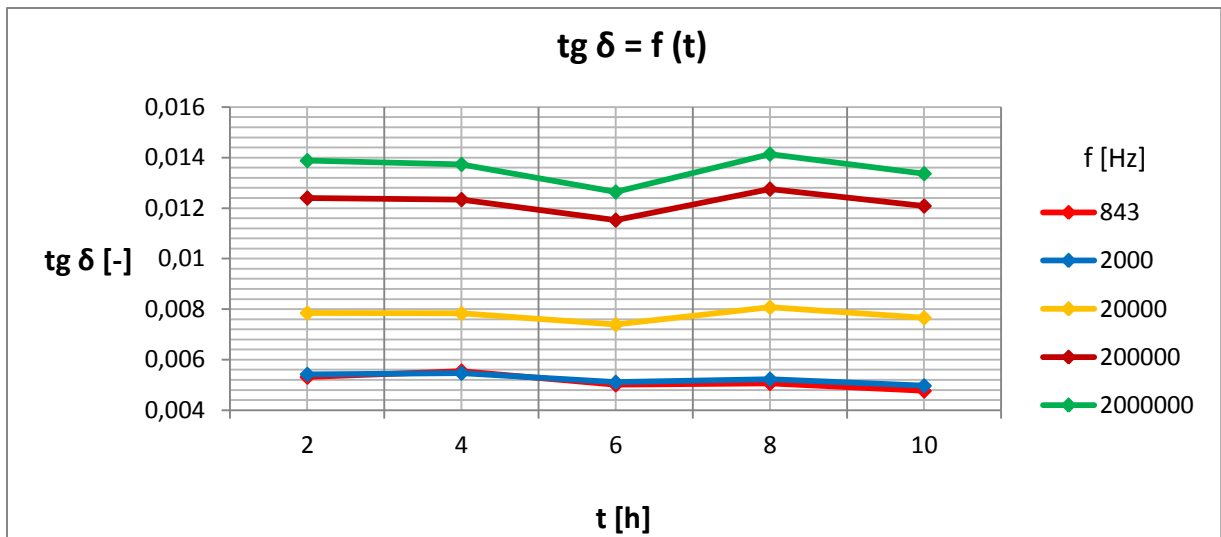


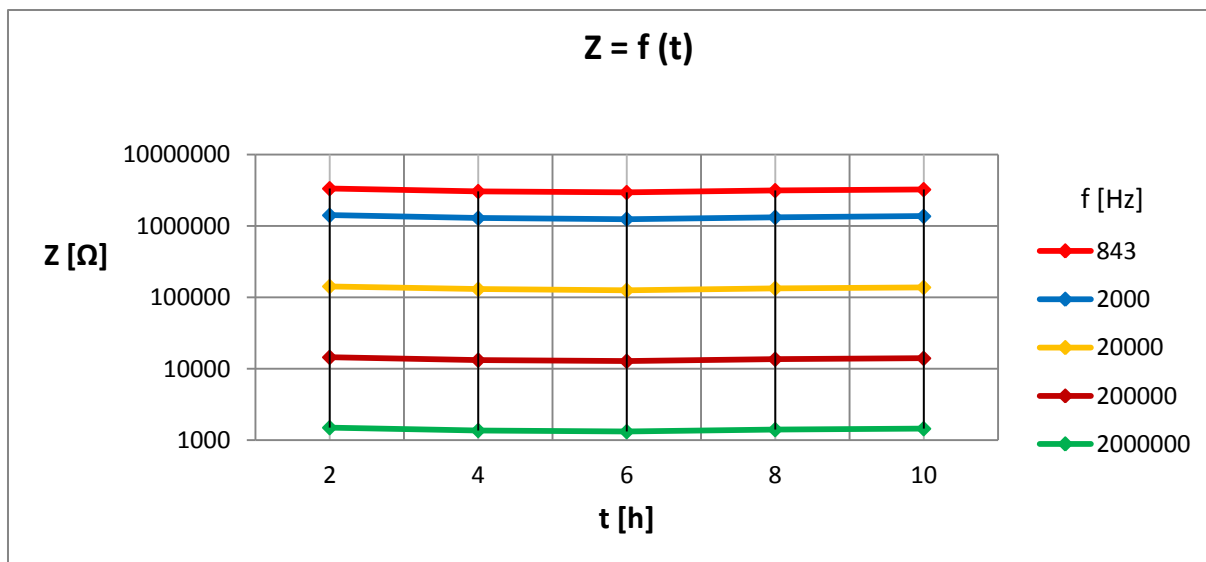


Příloha 17

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
C	$\vartheta=186\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

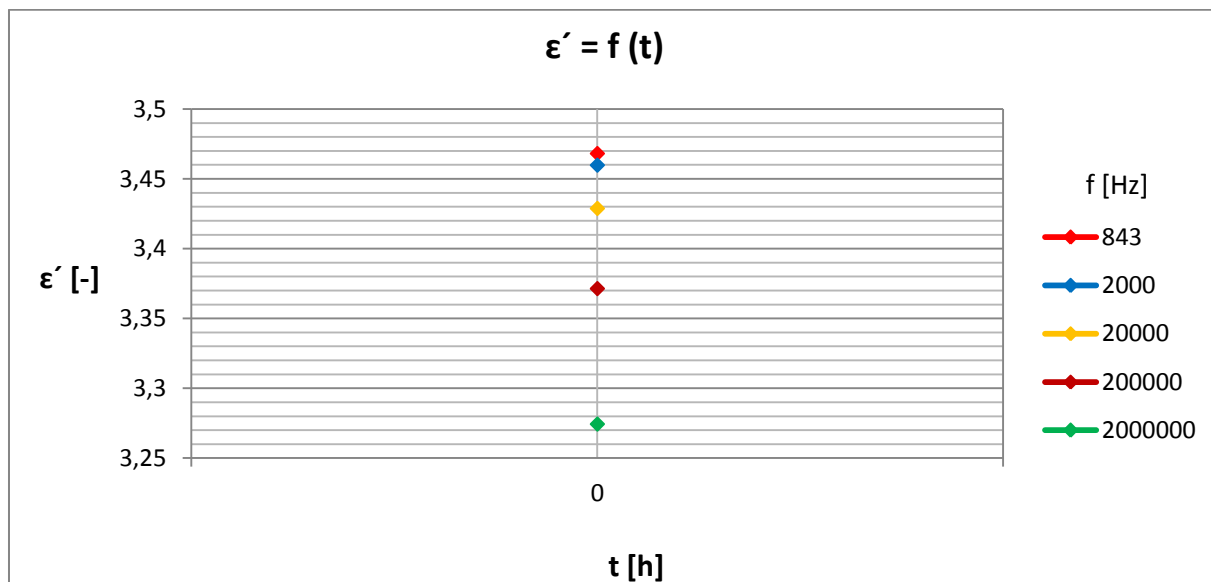


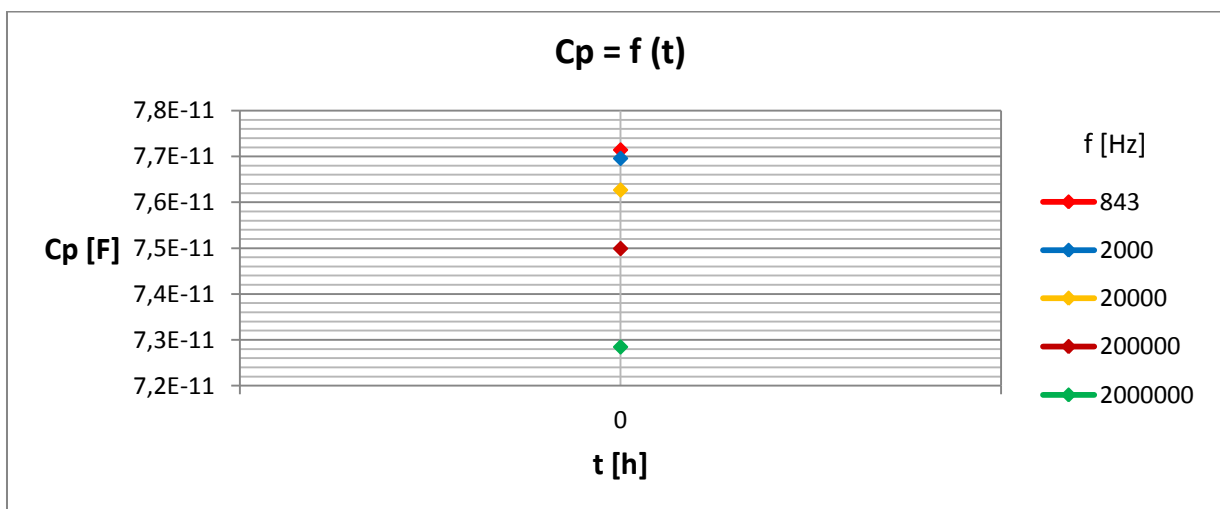
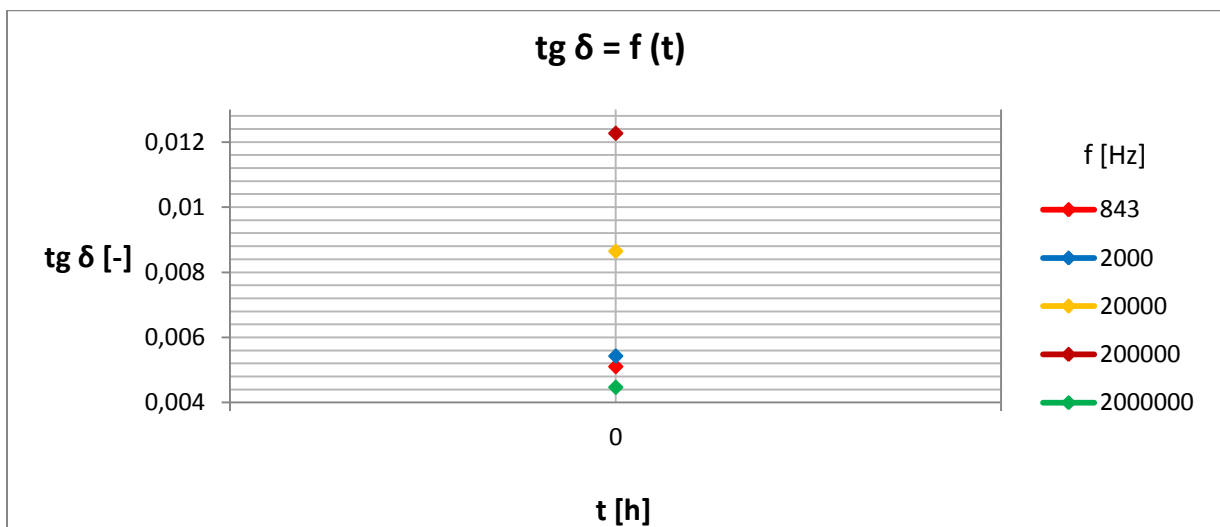
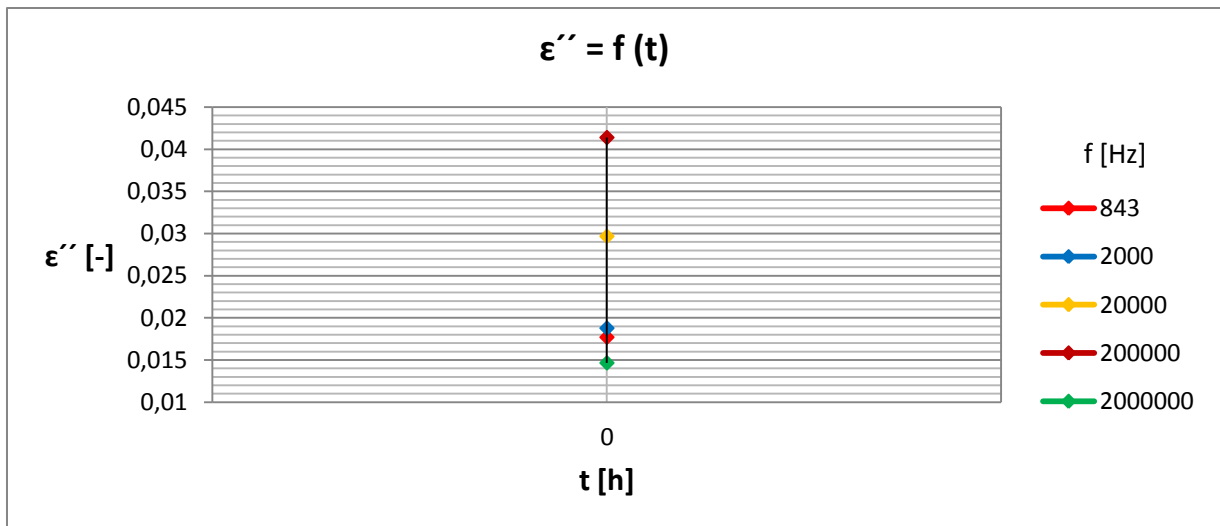


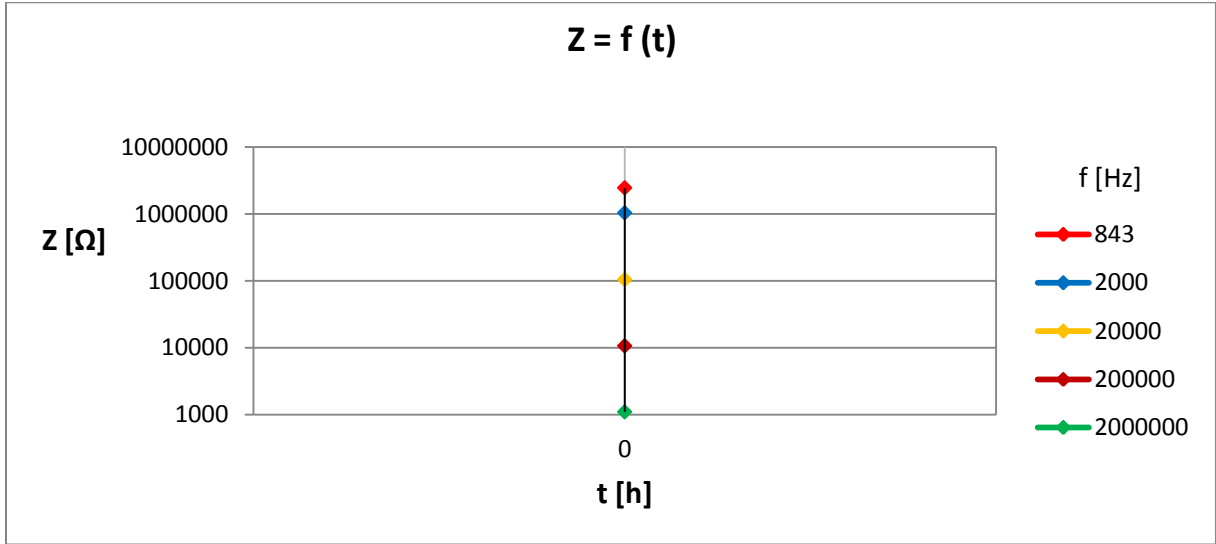
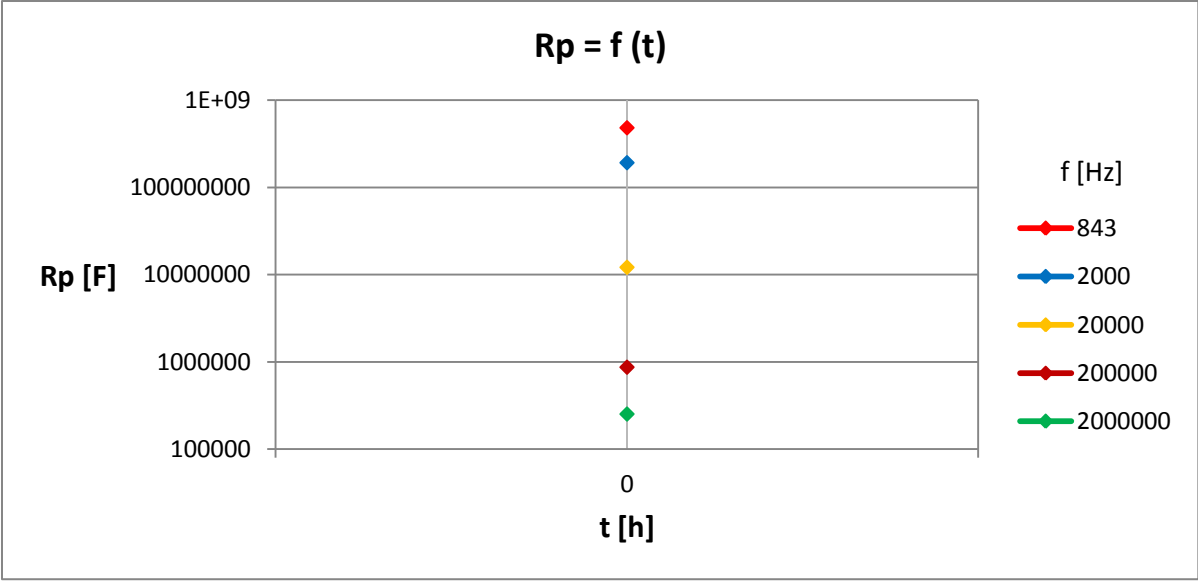


### Příloha 18

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta = 20\text{ °C}$ (dodaný stav)	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)



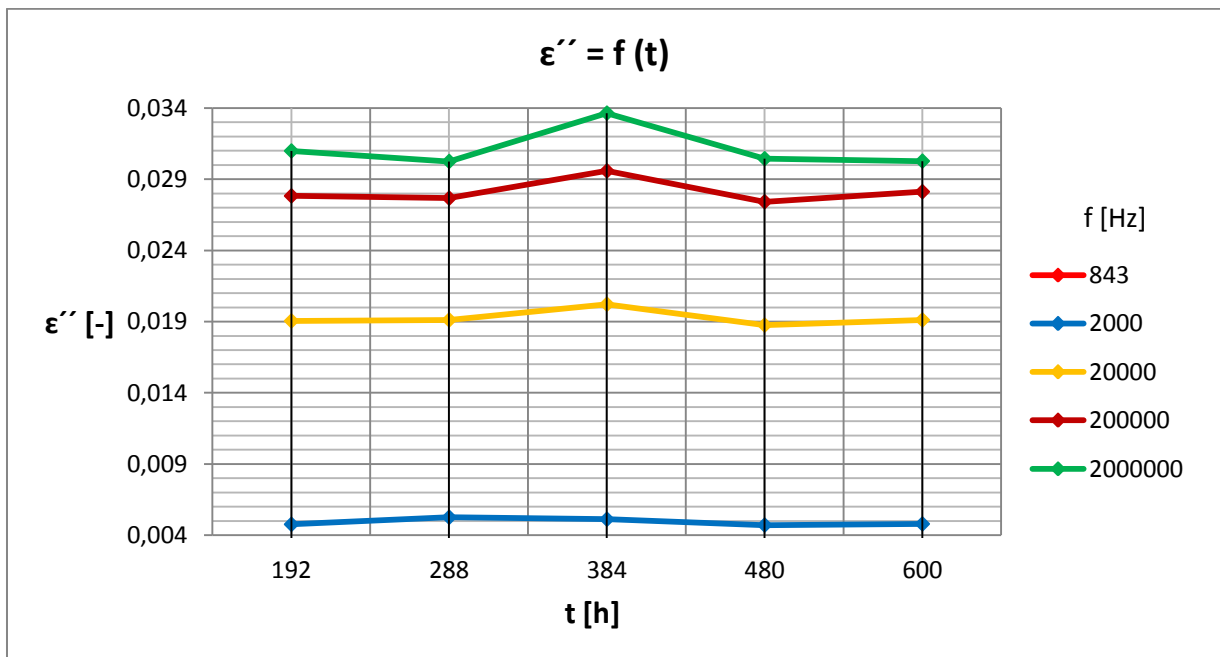
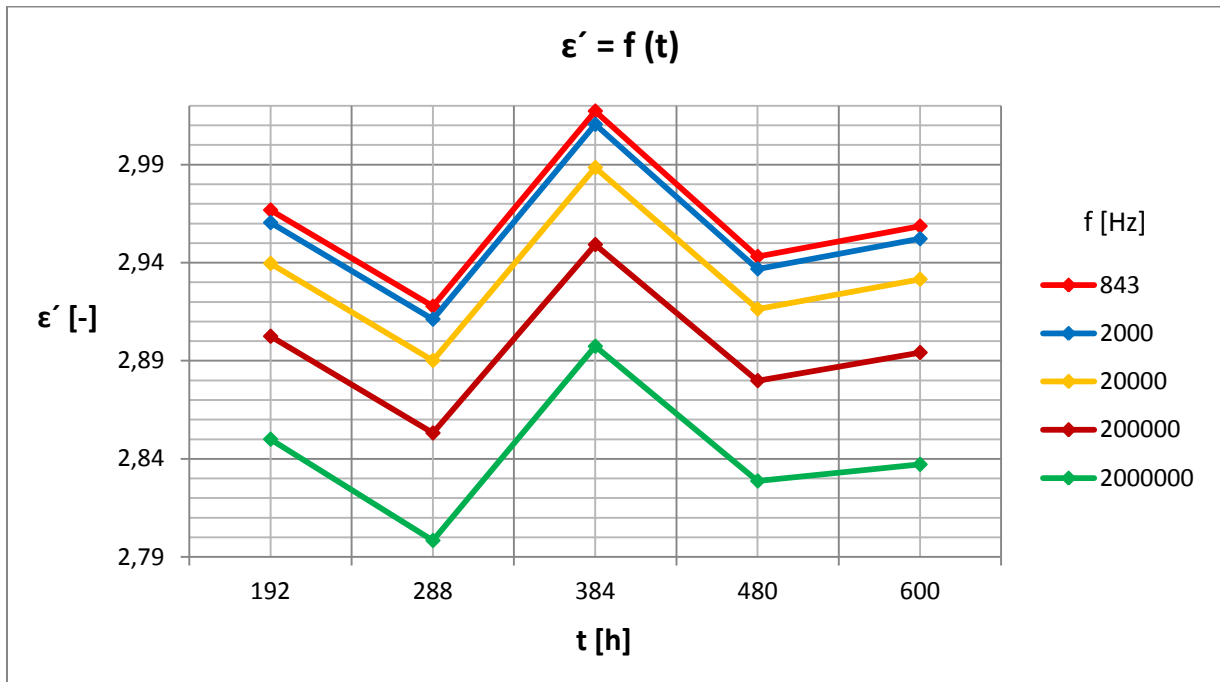


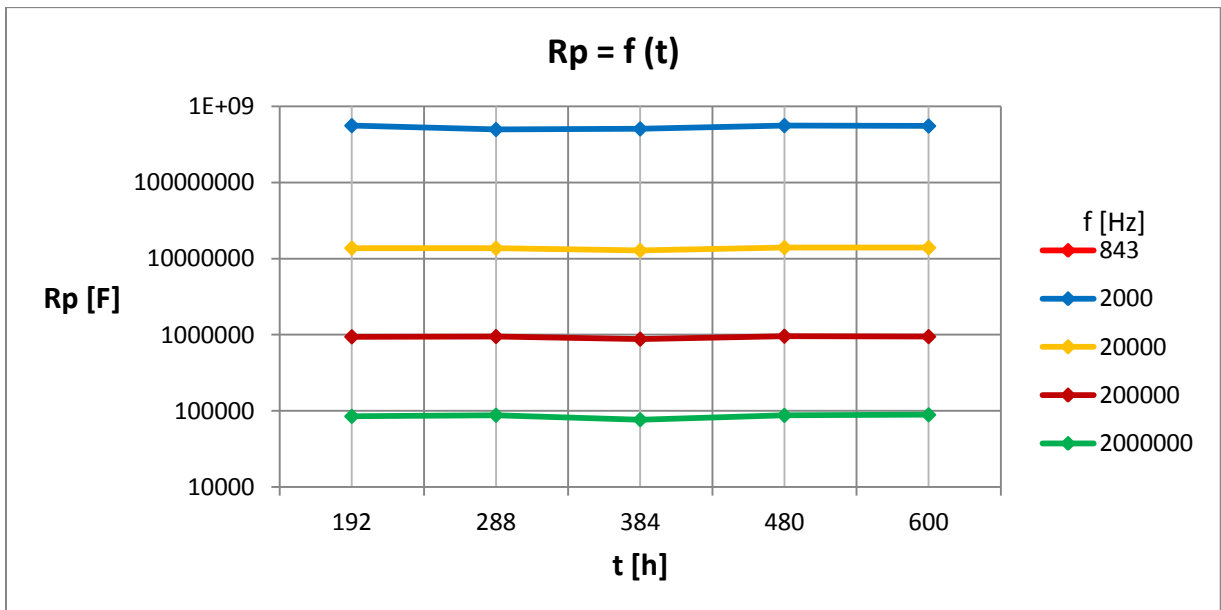
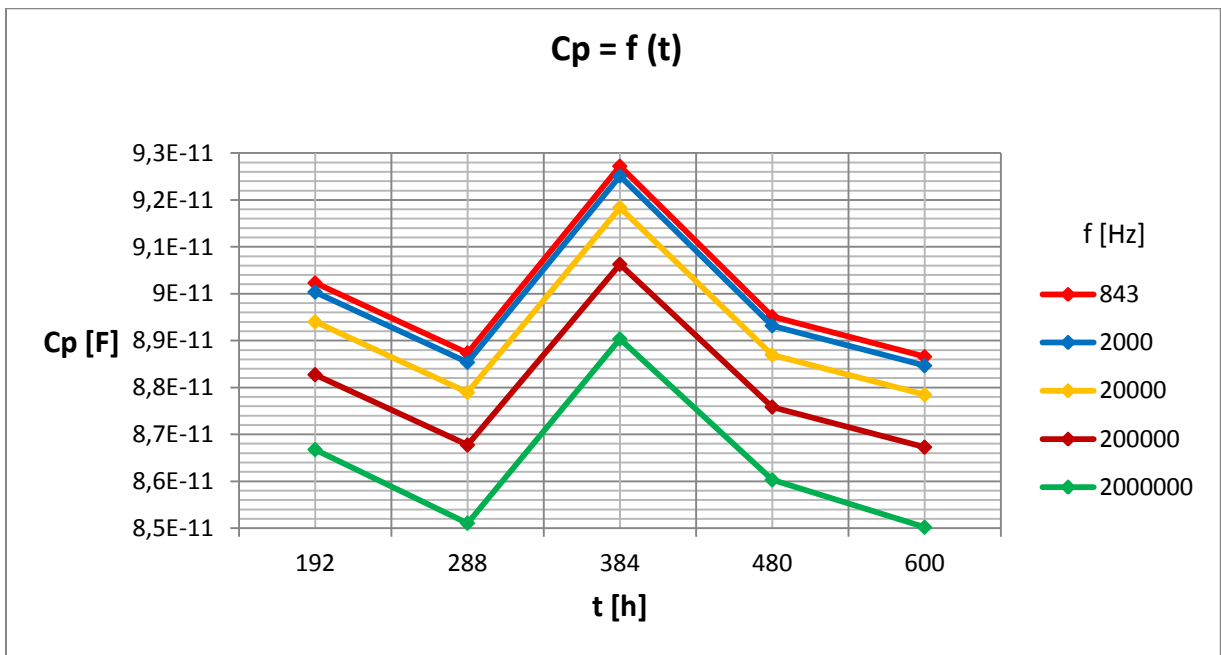
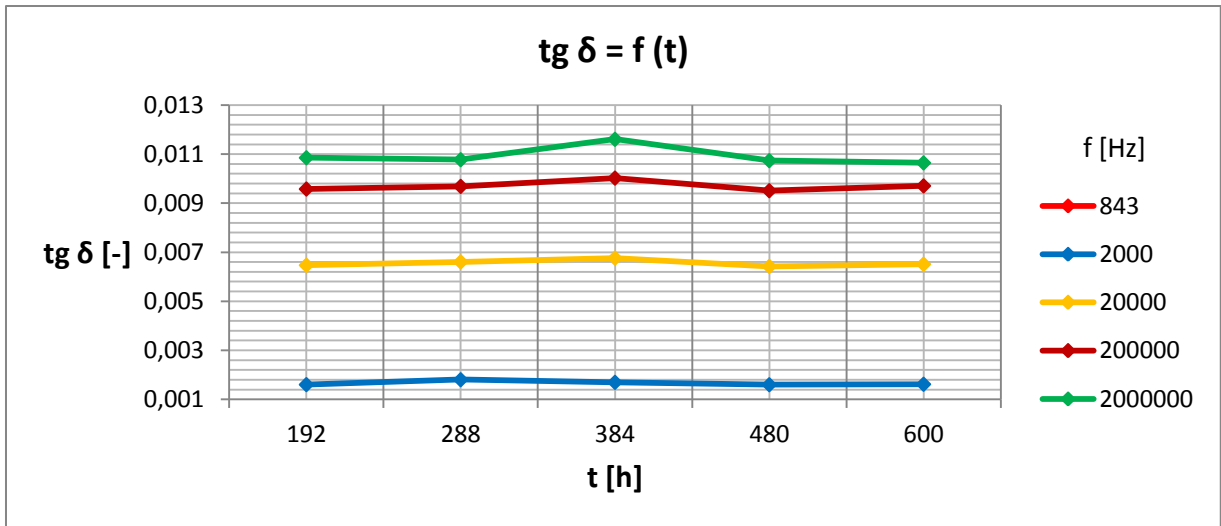


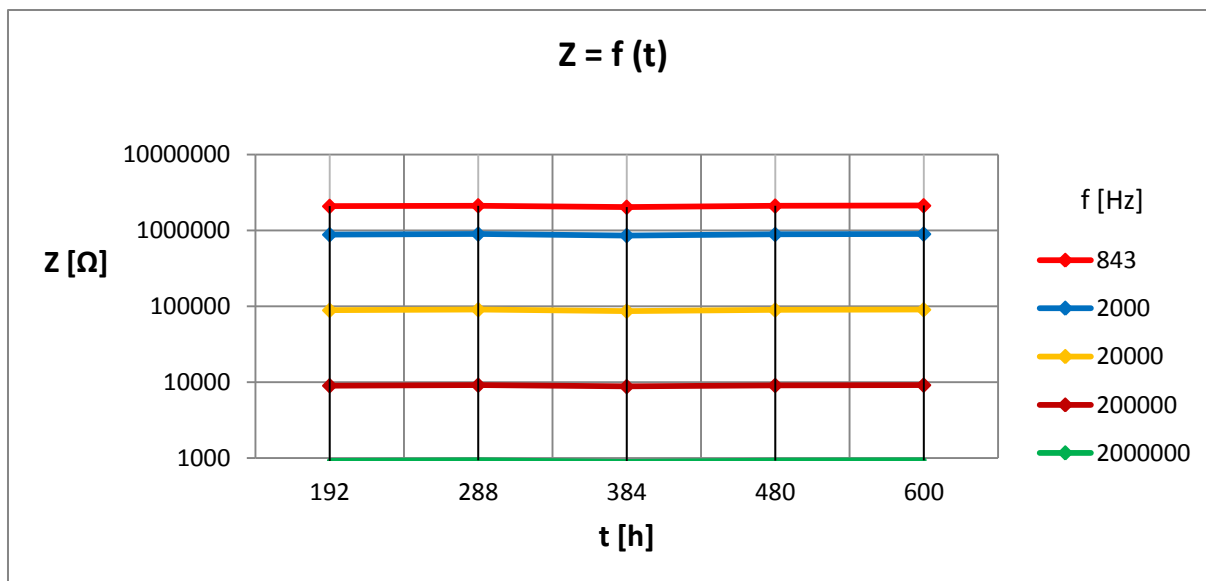


## Příloha 19

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=170\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

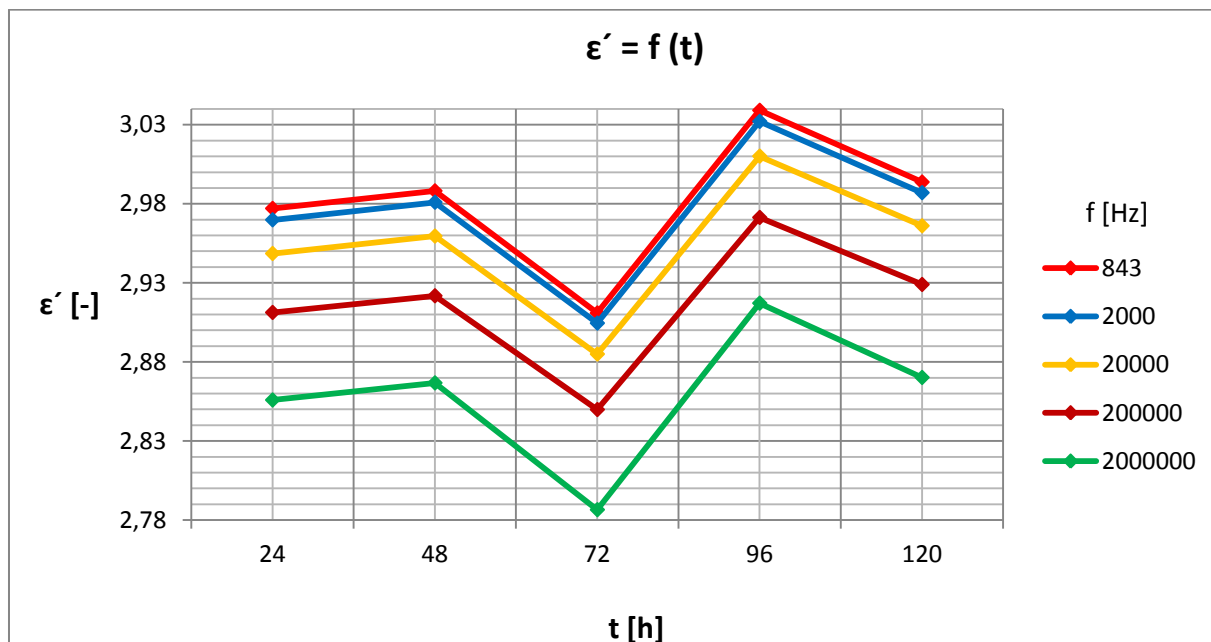


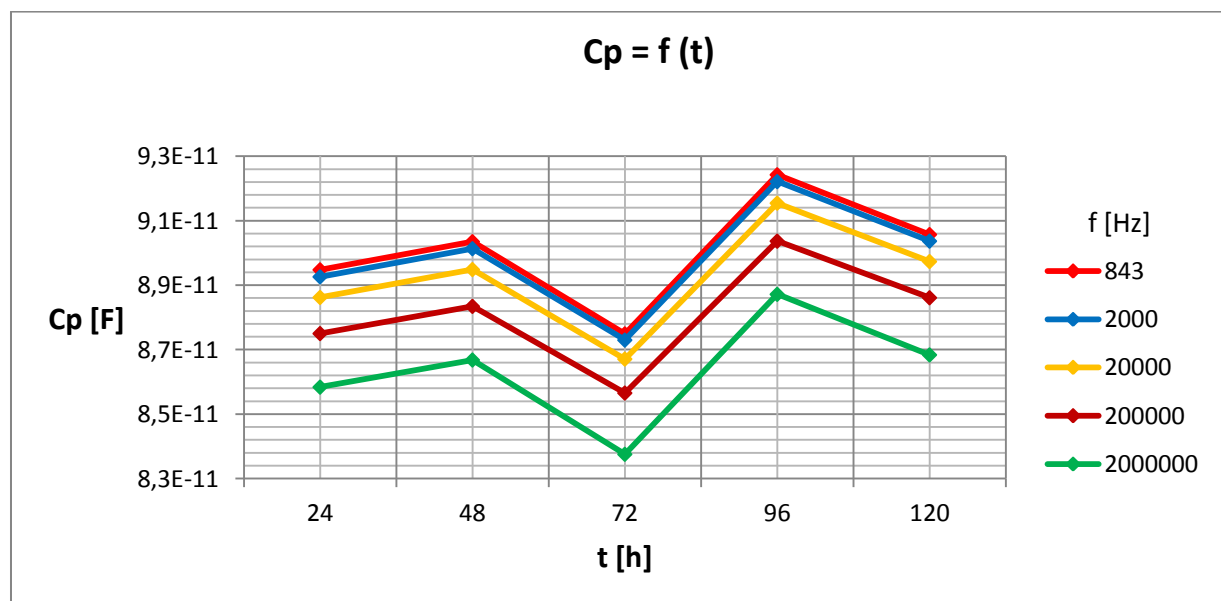
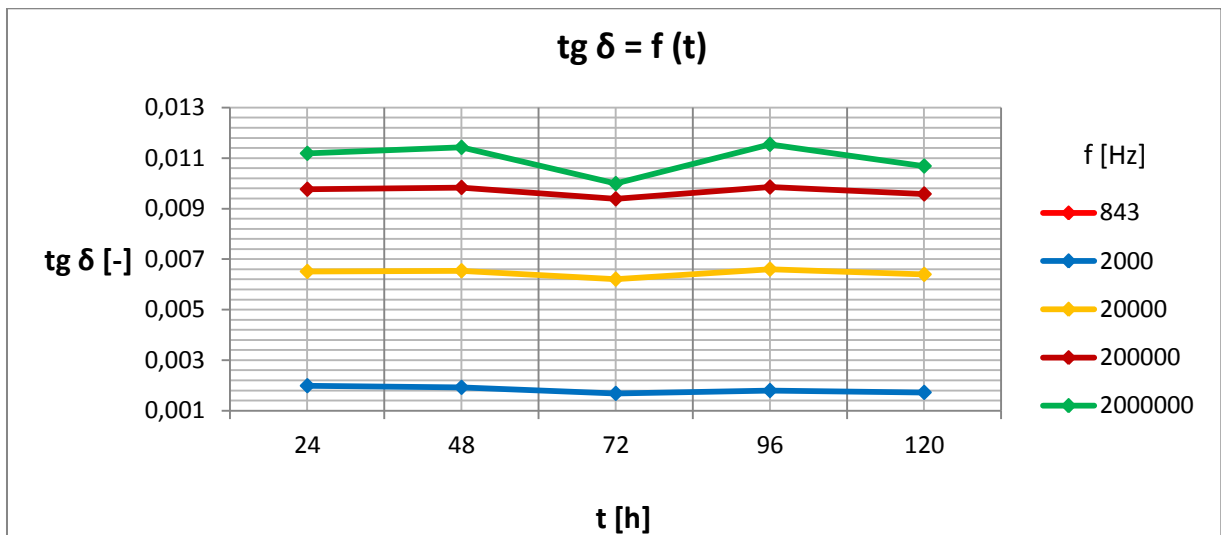
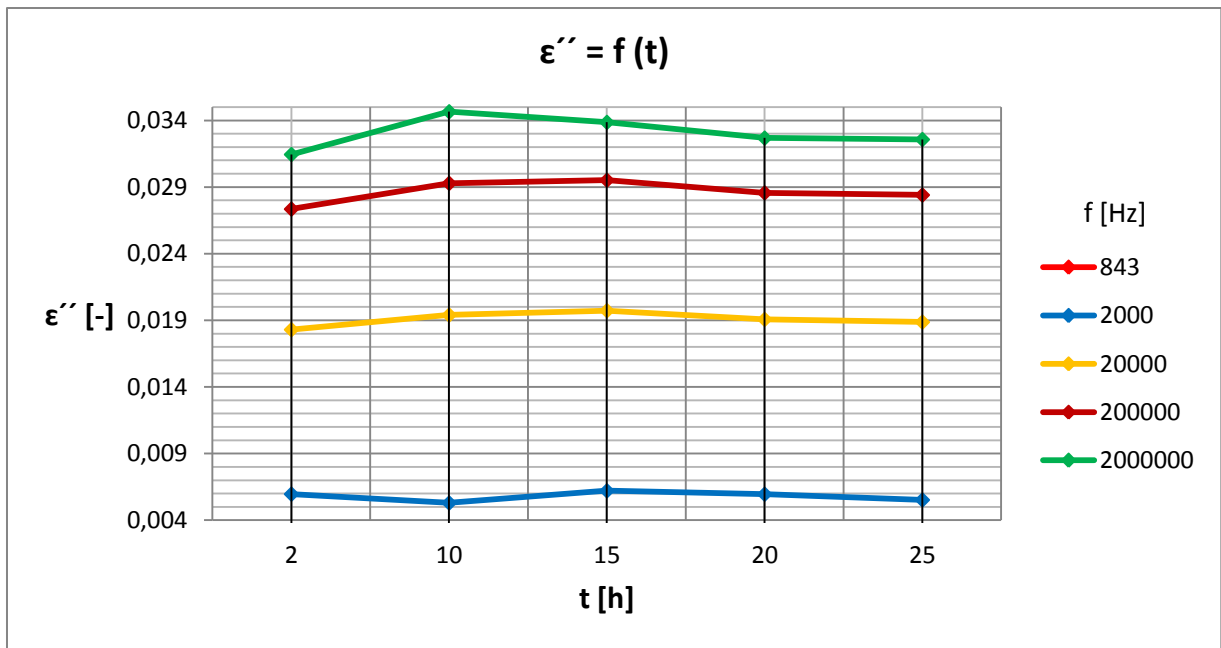


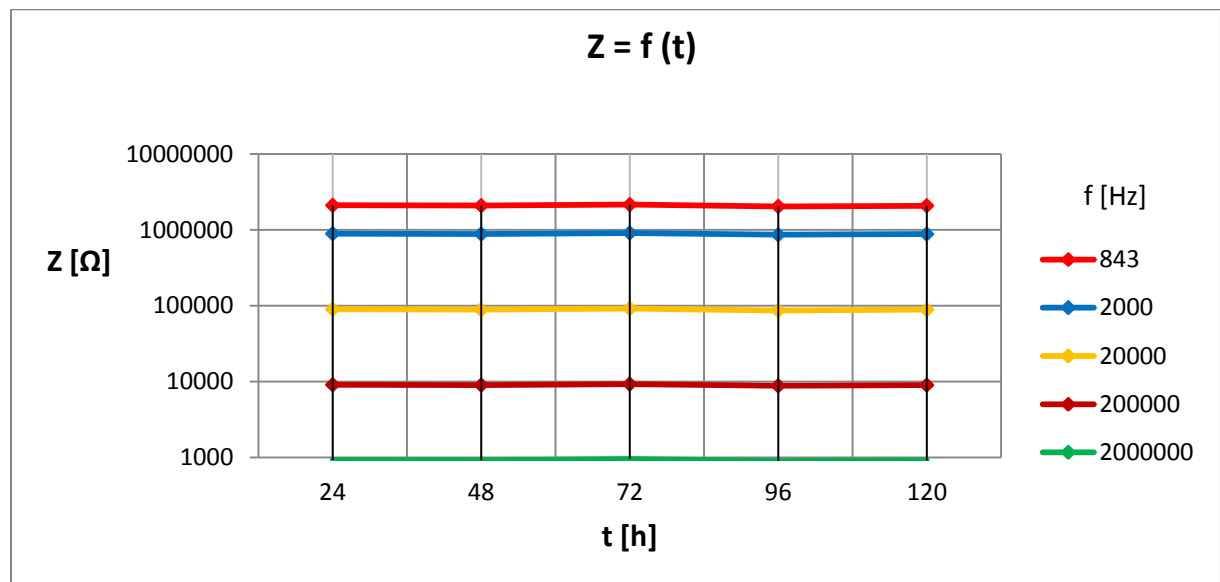
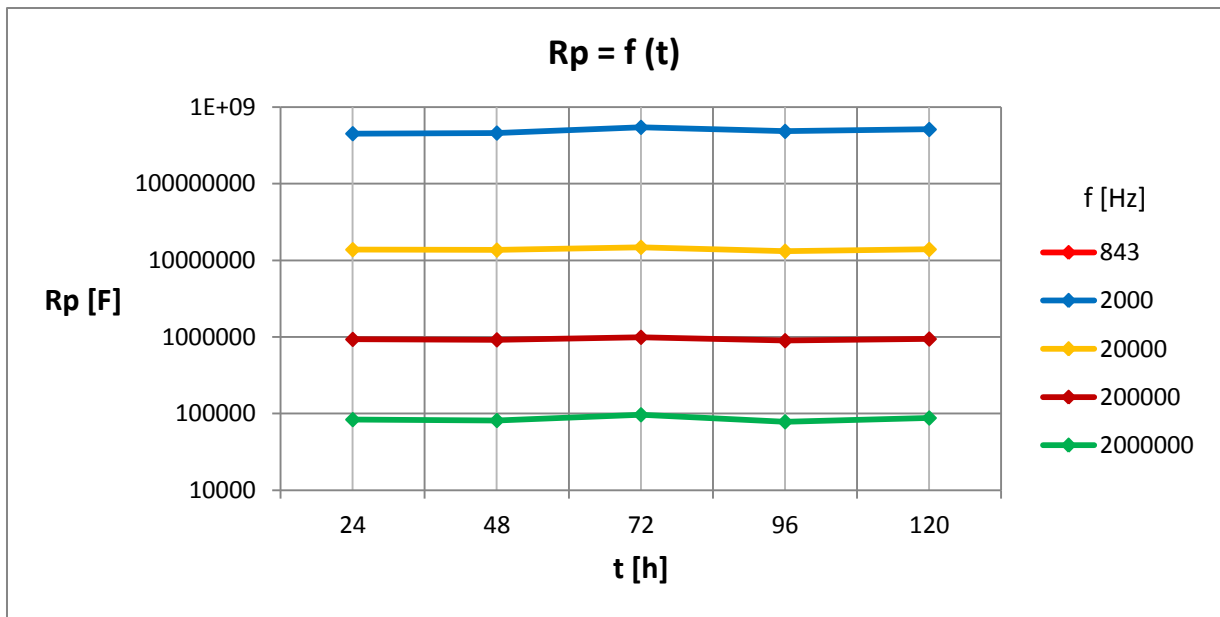


### Příloha 20

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta = 178\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

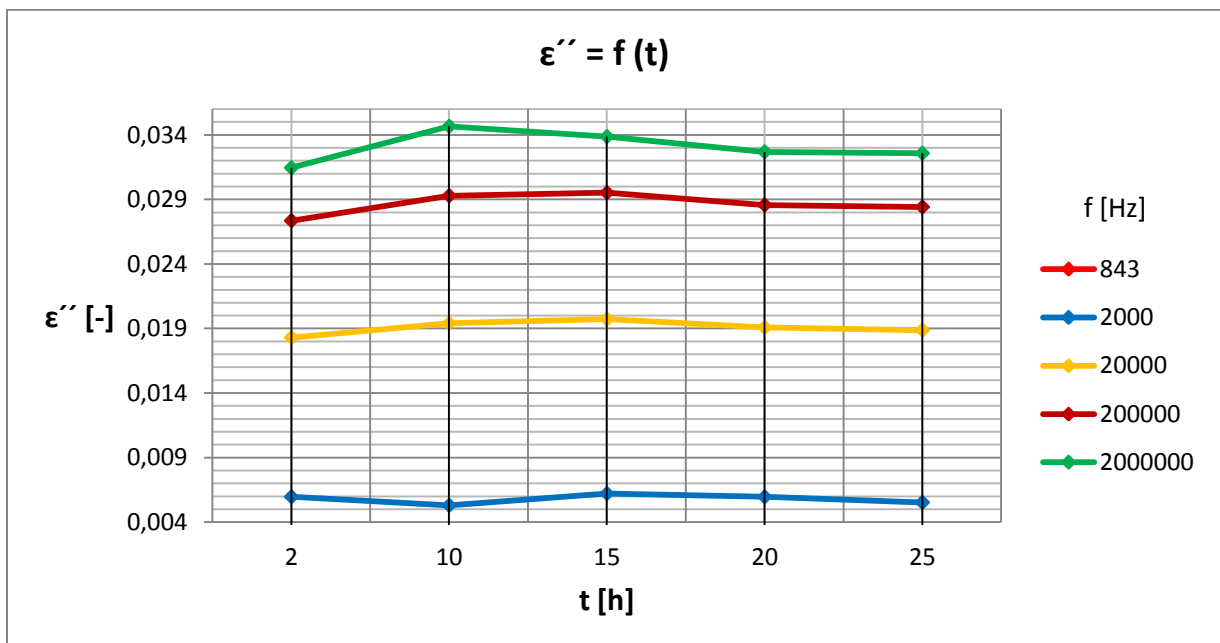
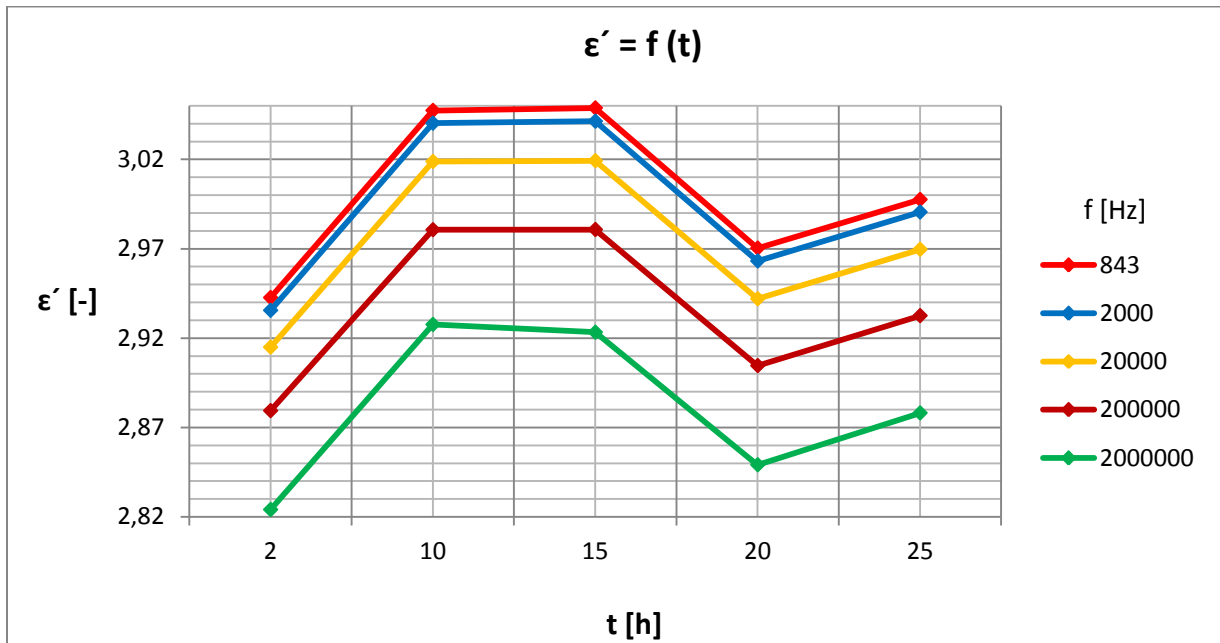


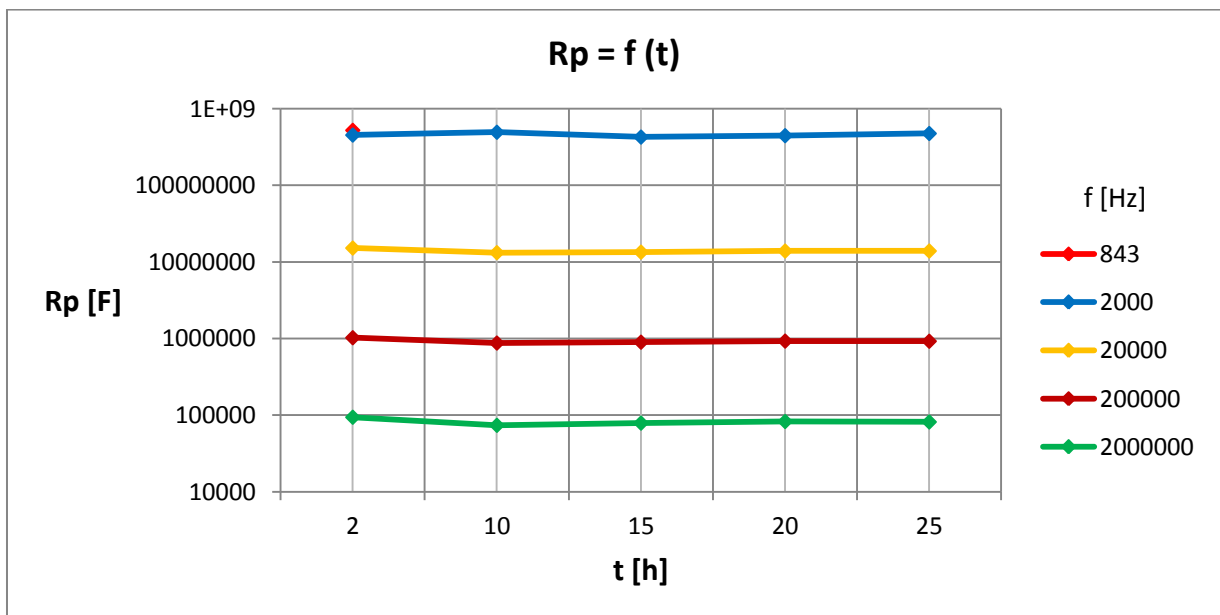
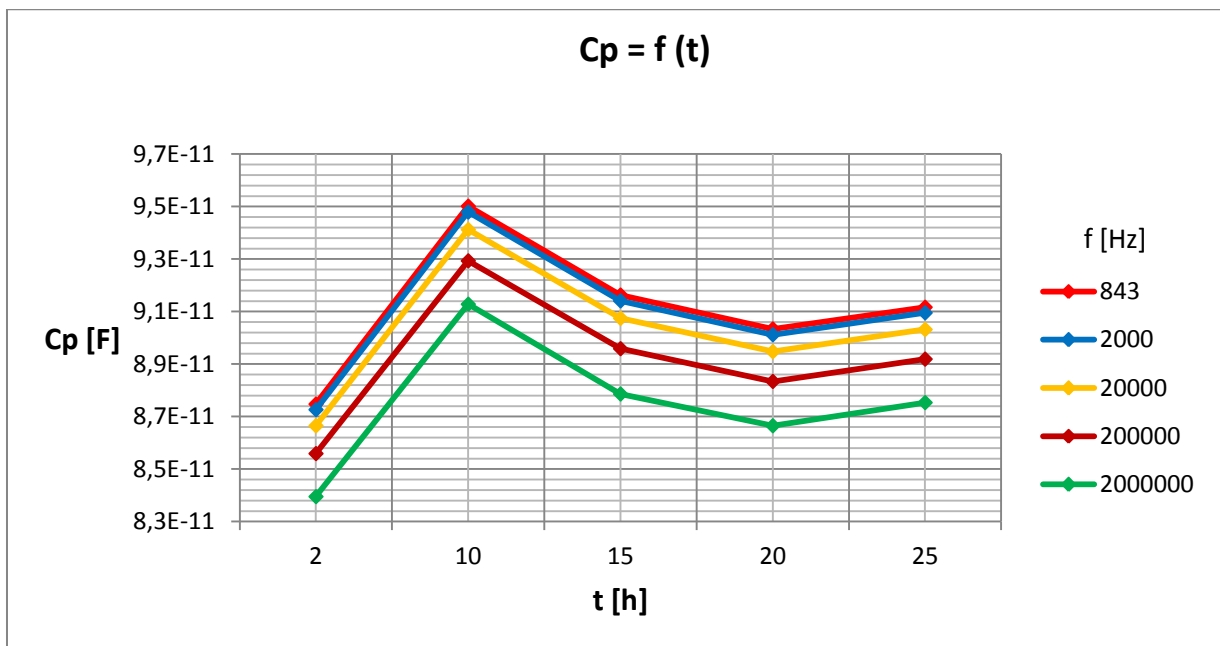
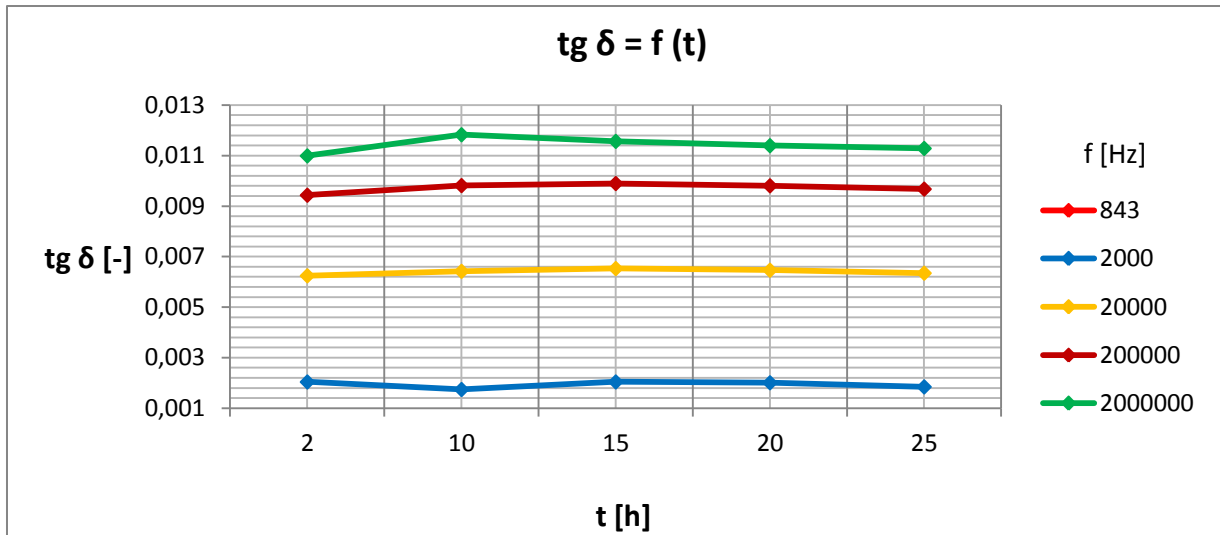


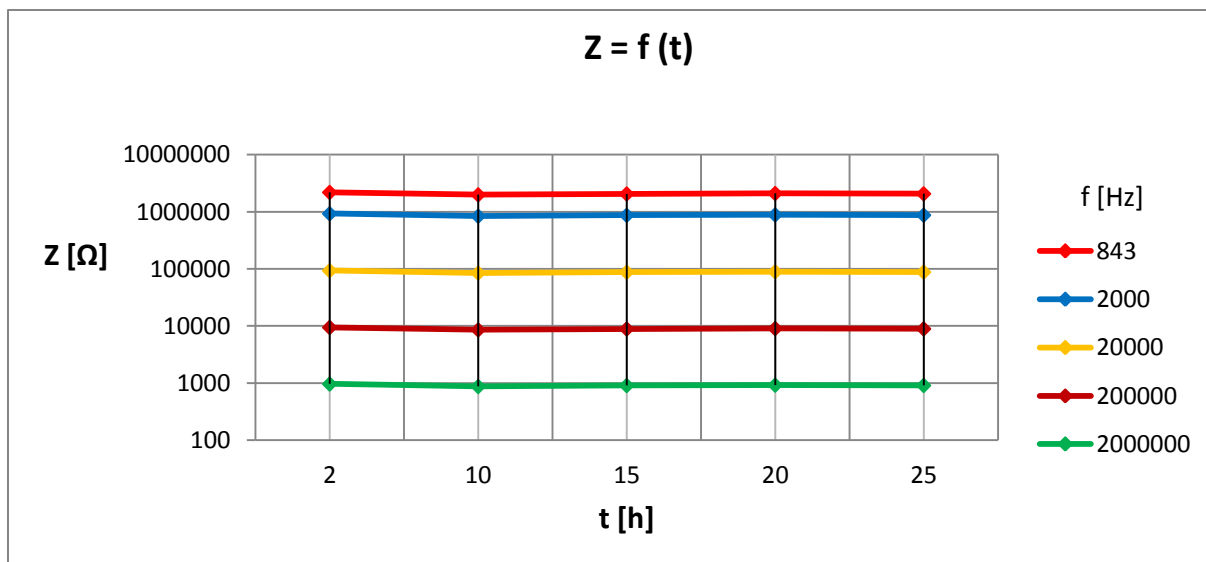


Příloha 21

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta=186\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

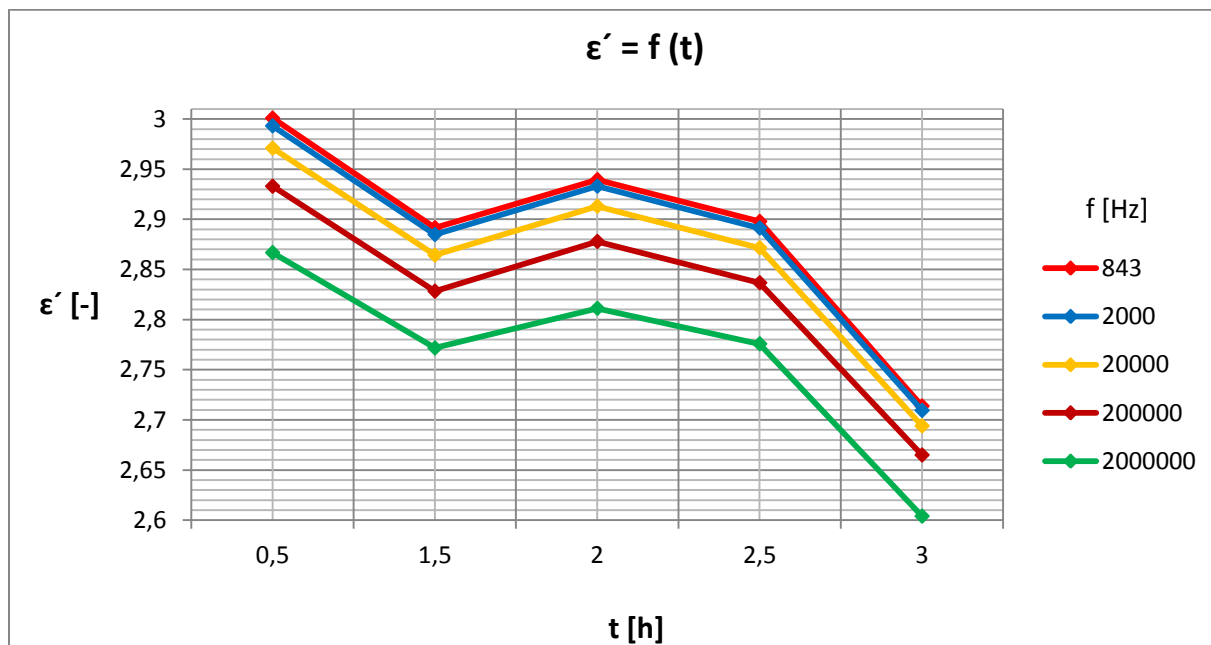




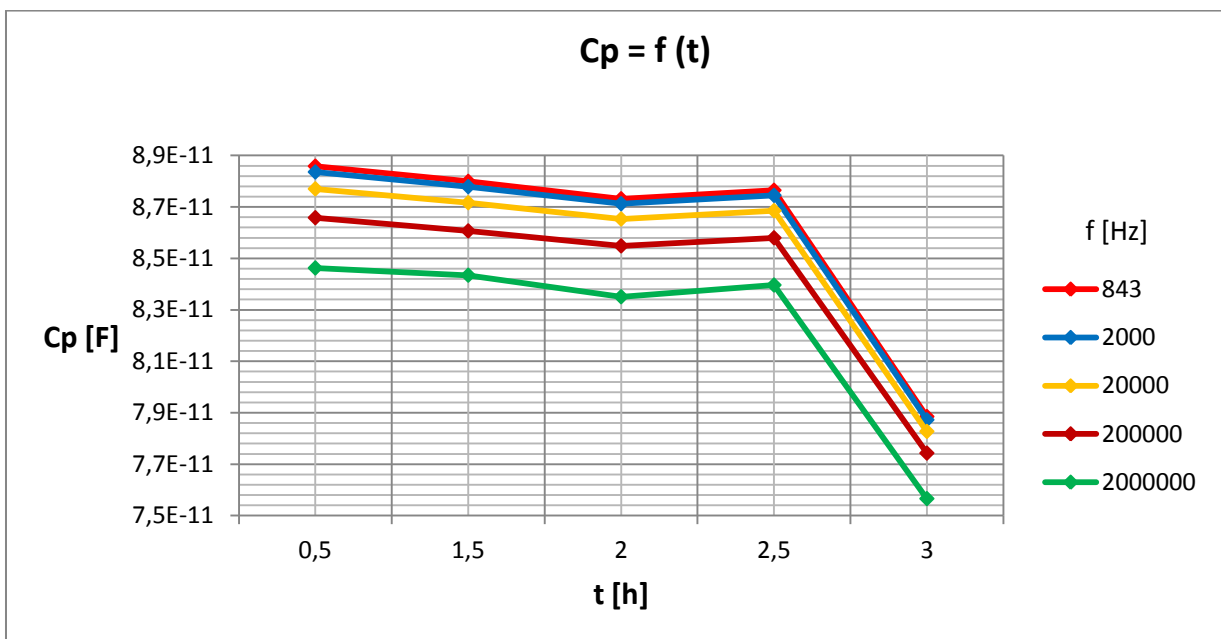
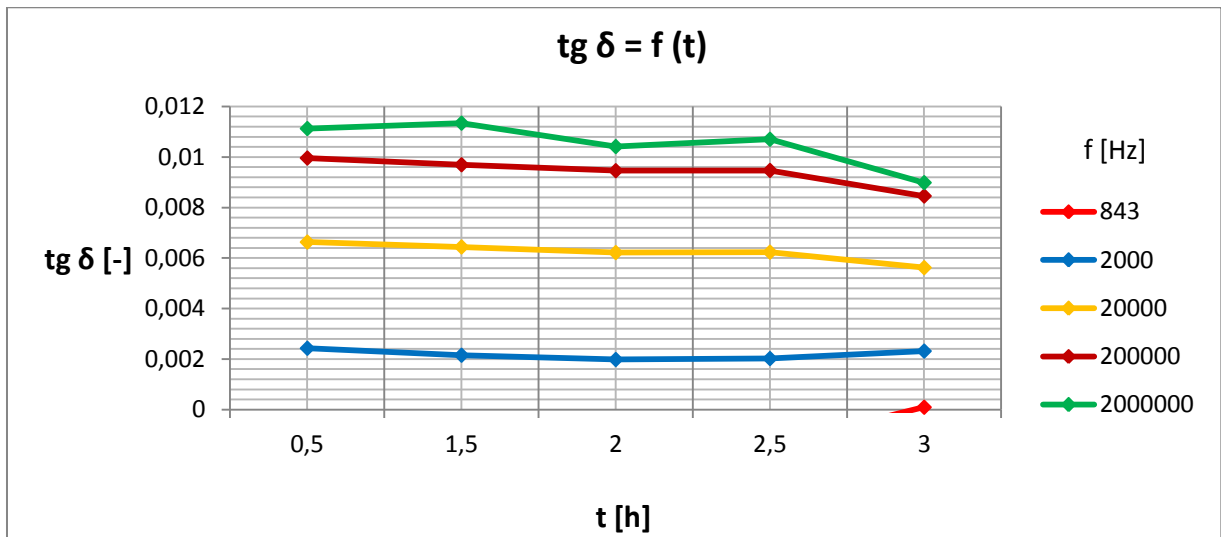
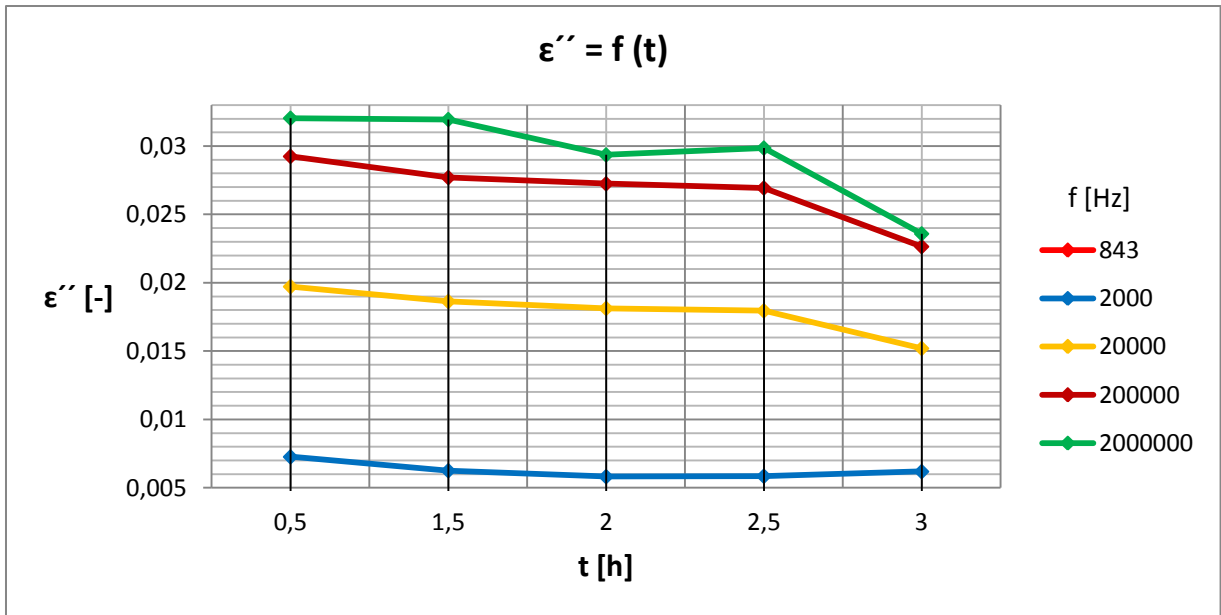


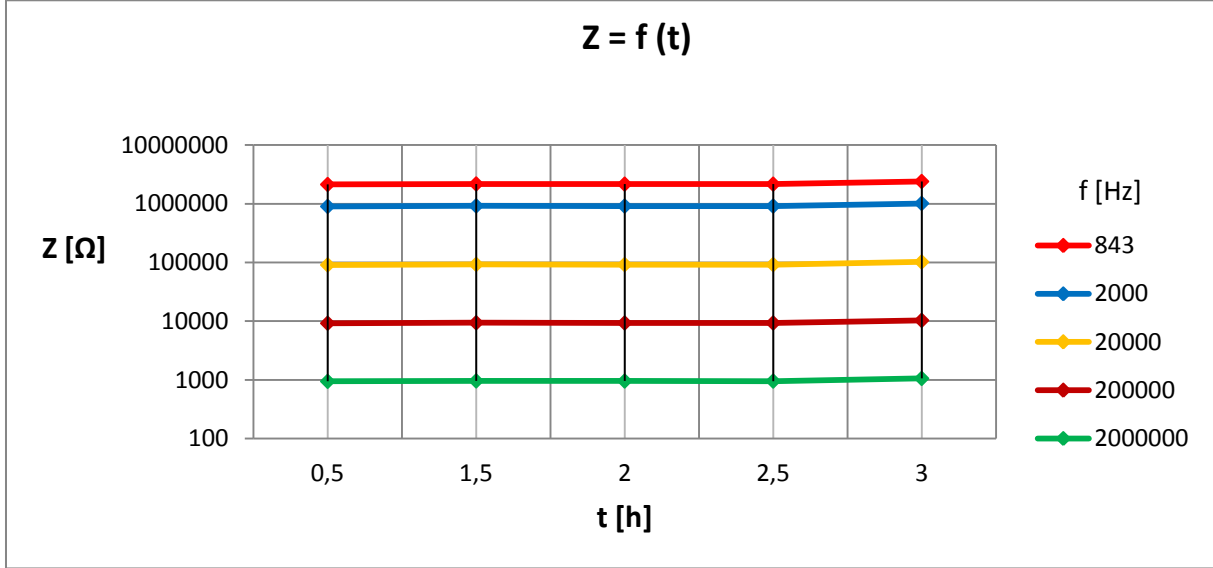
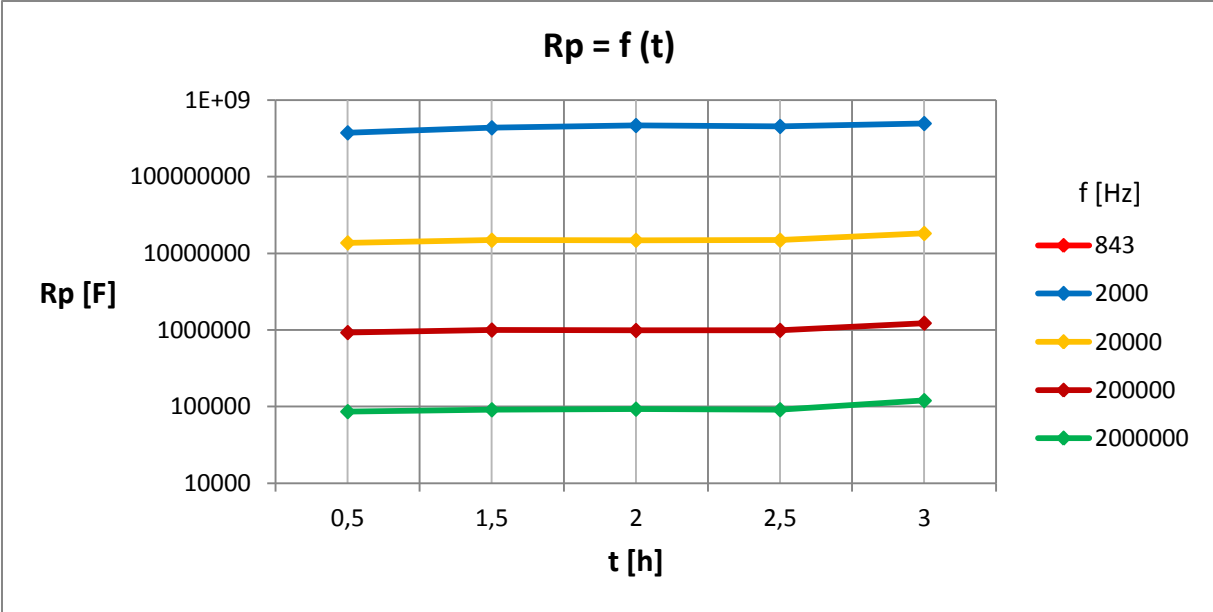
**Příloha 22**

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
D	$\vartheta = 194$ °C	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)



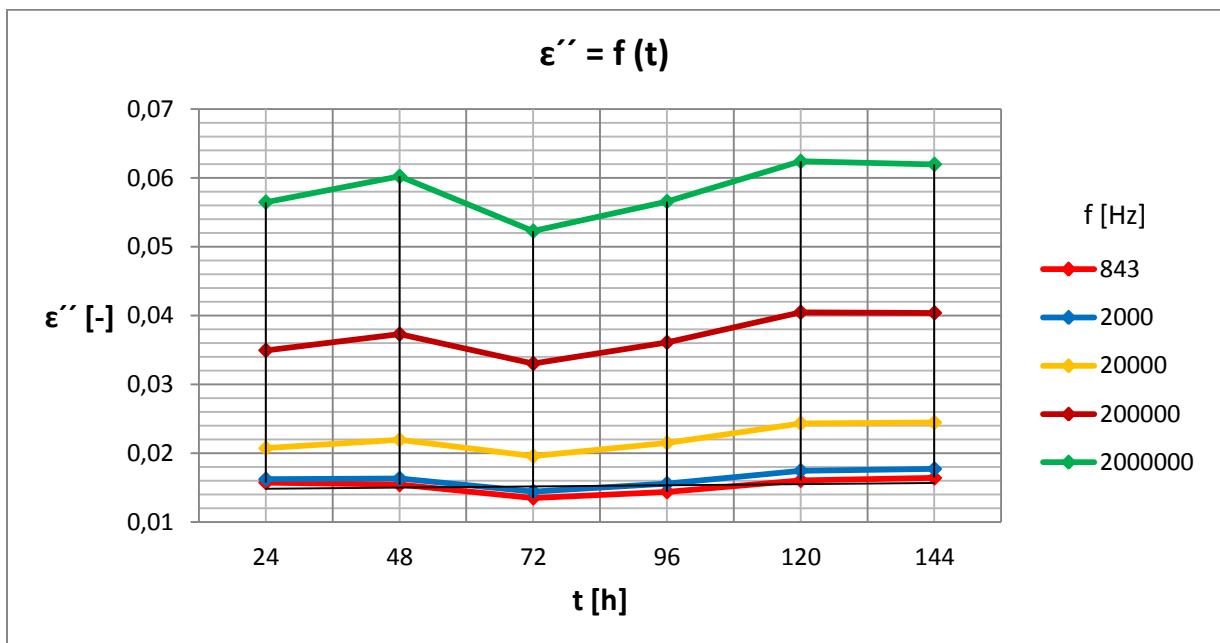
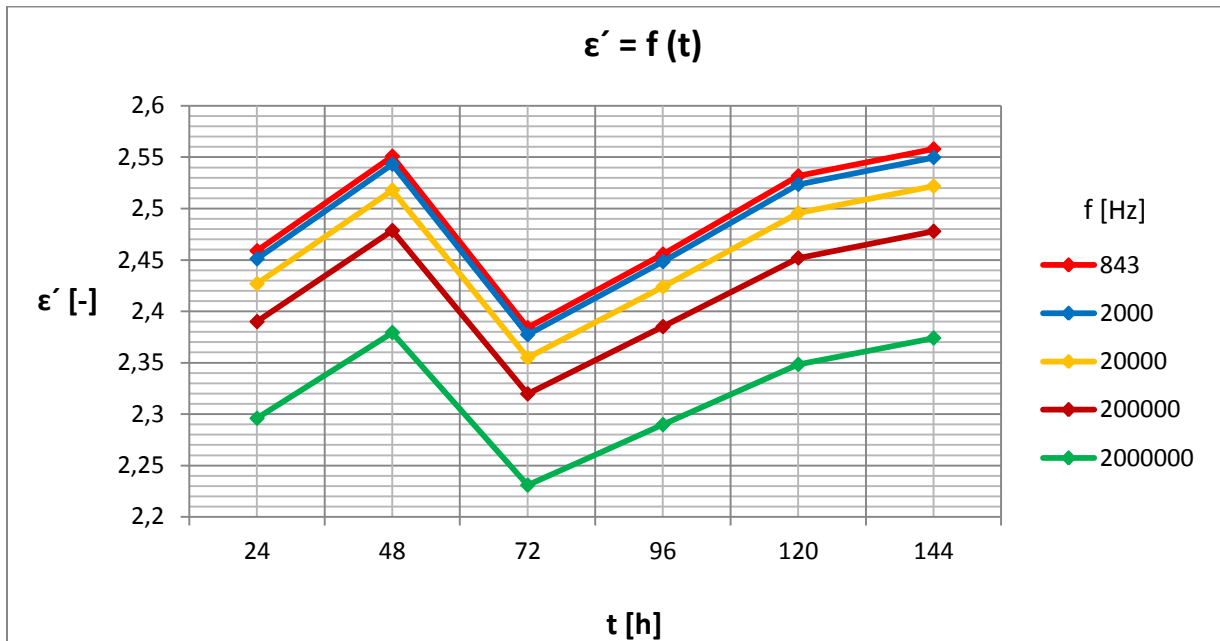


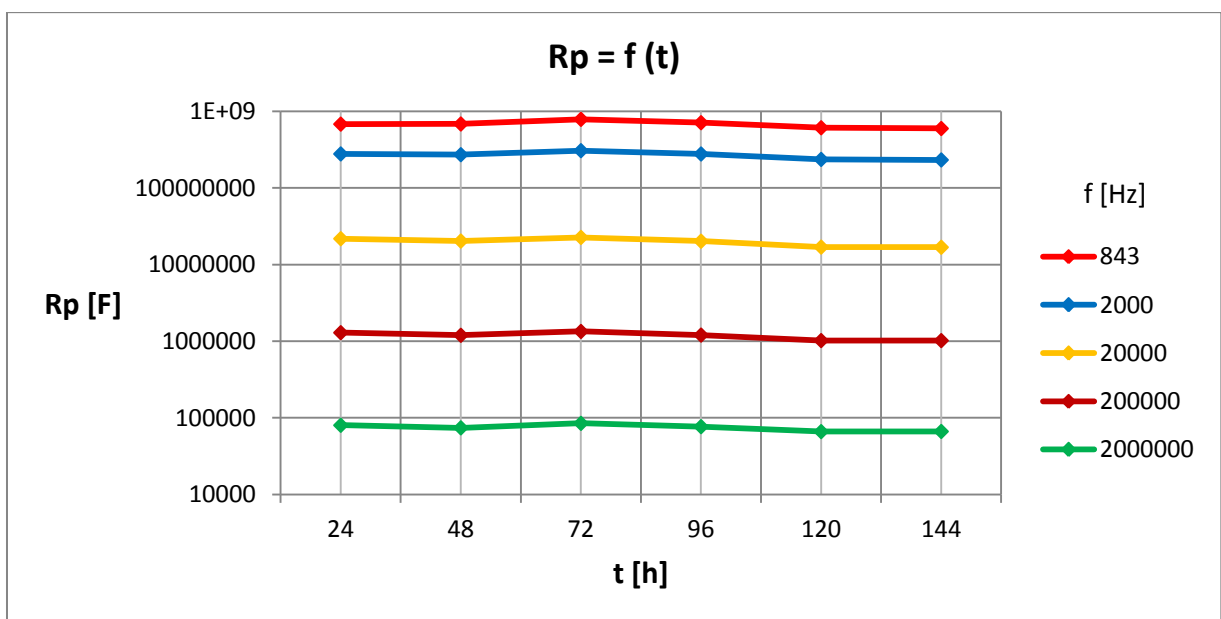
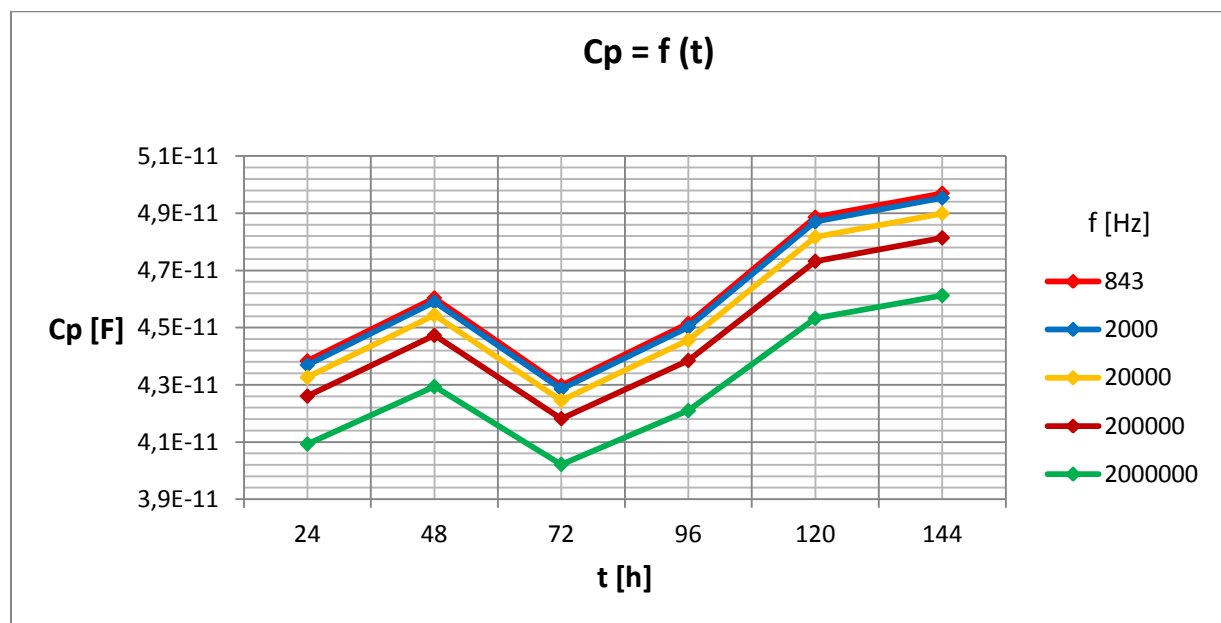
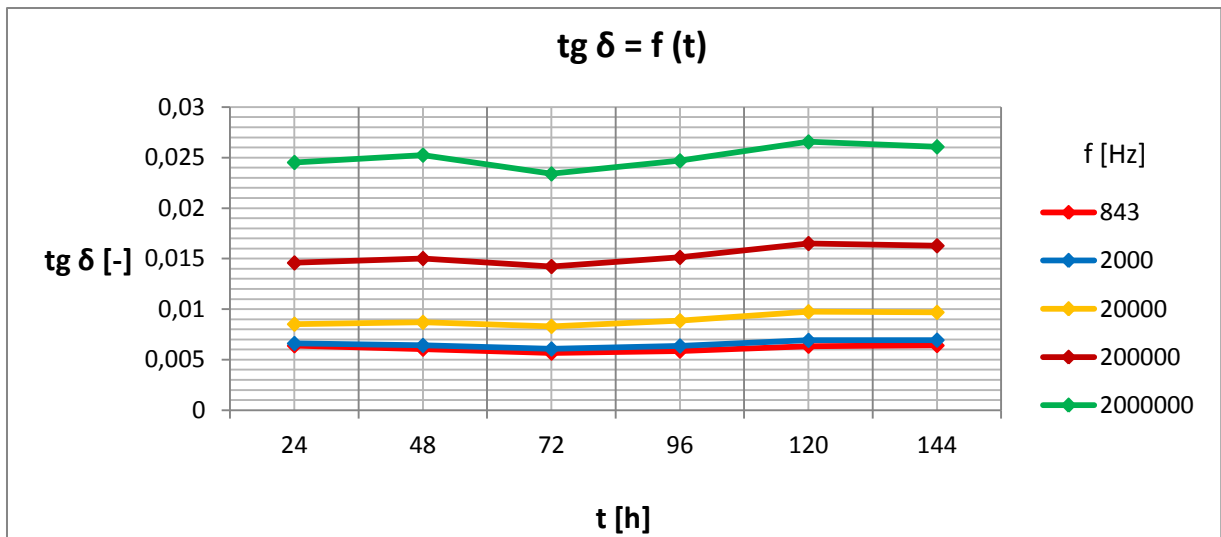


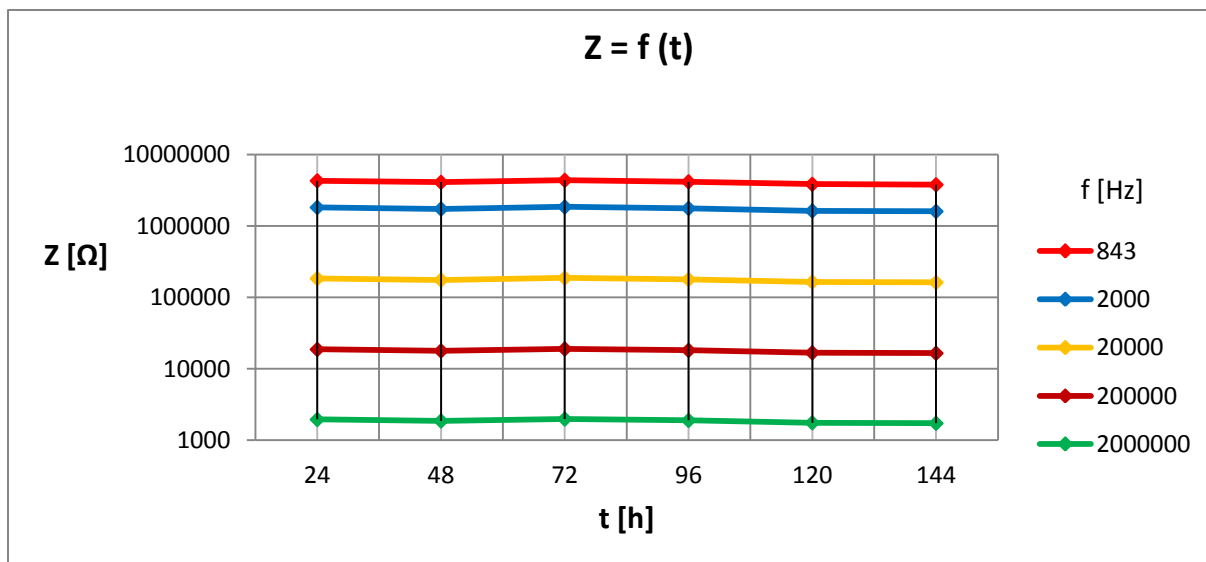


Příloha 23

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=170\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

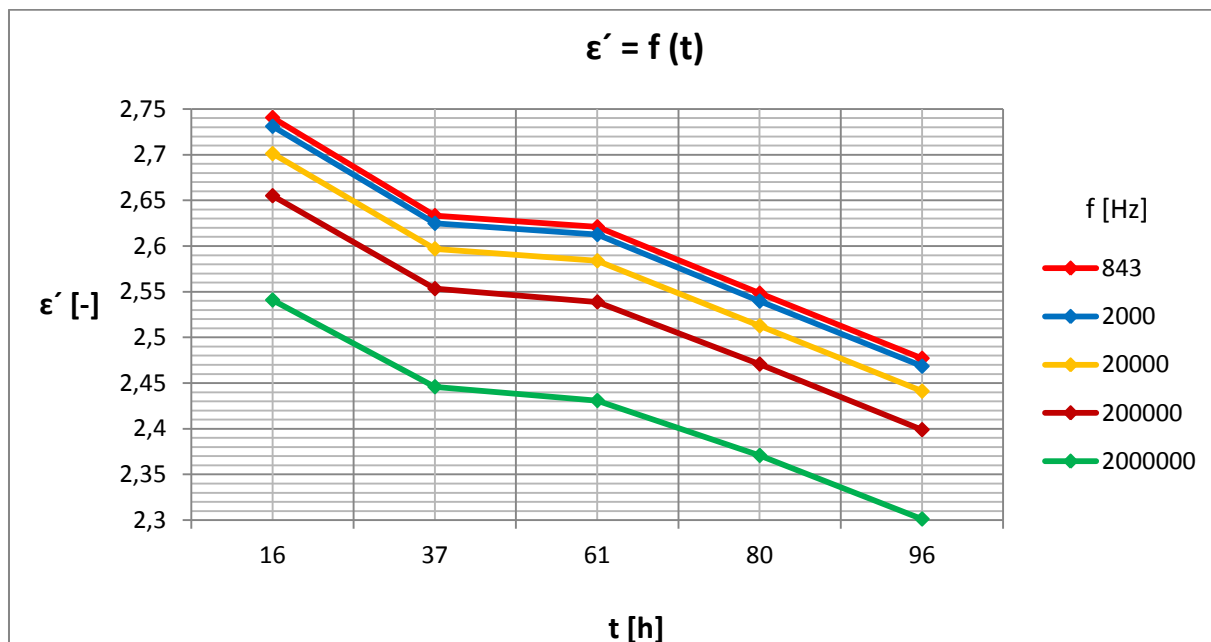


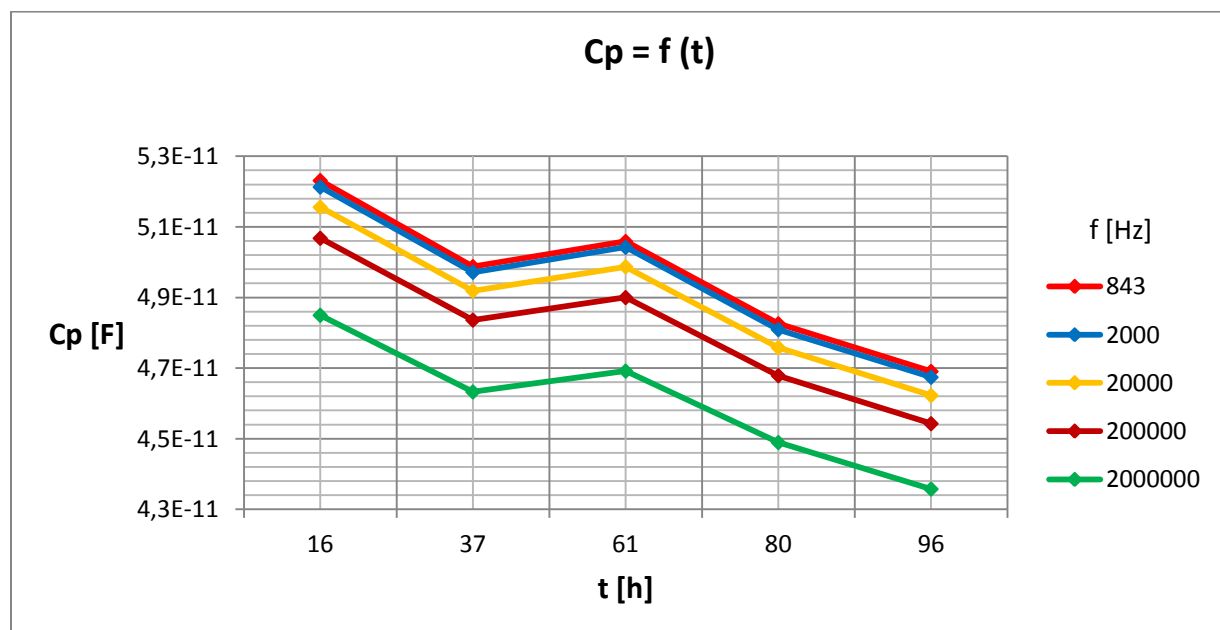
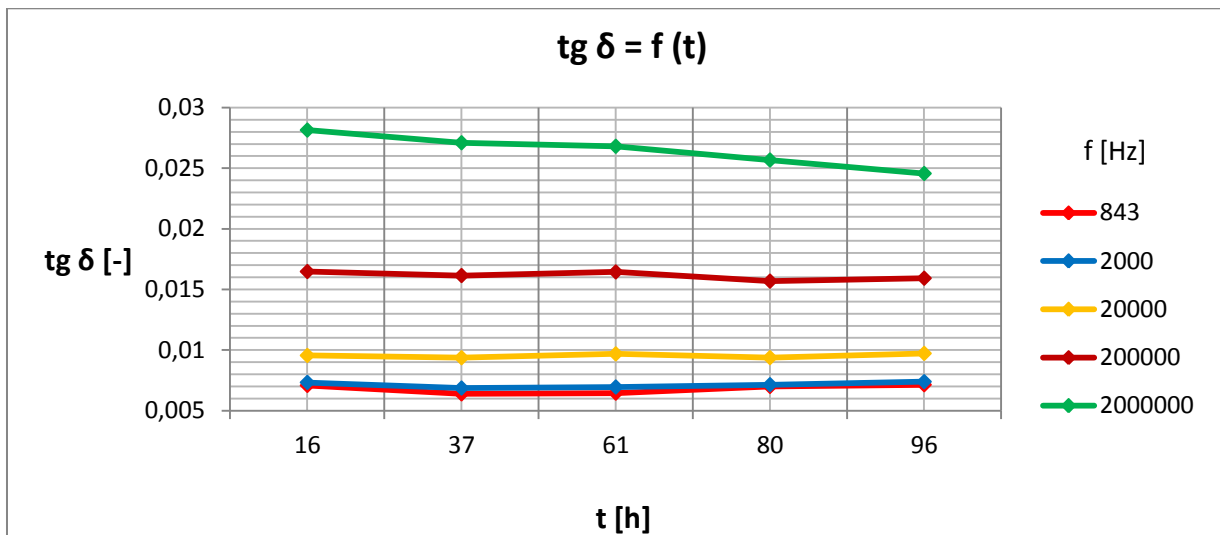
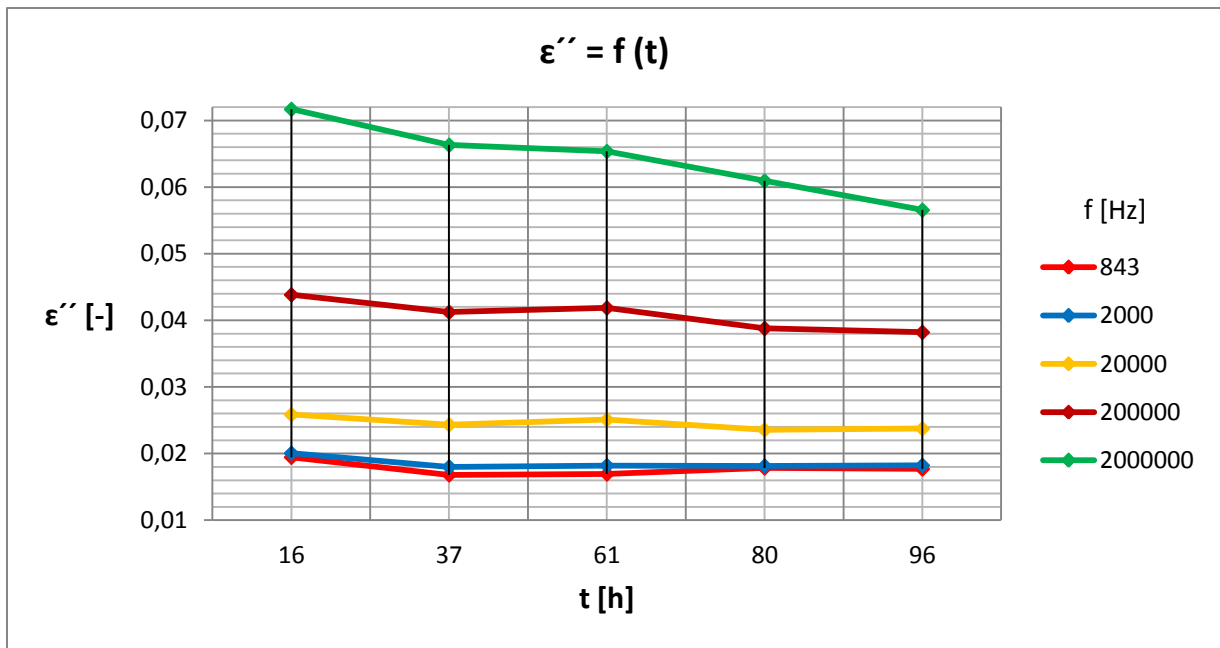


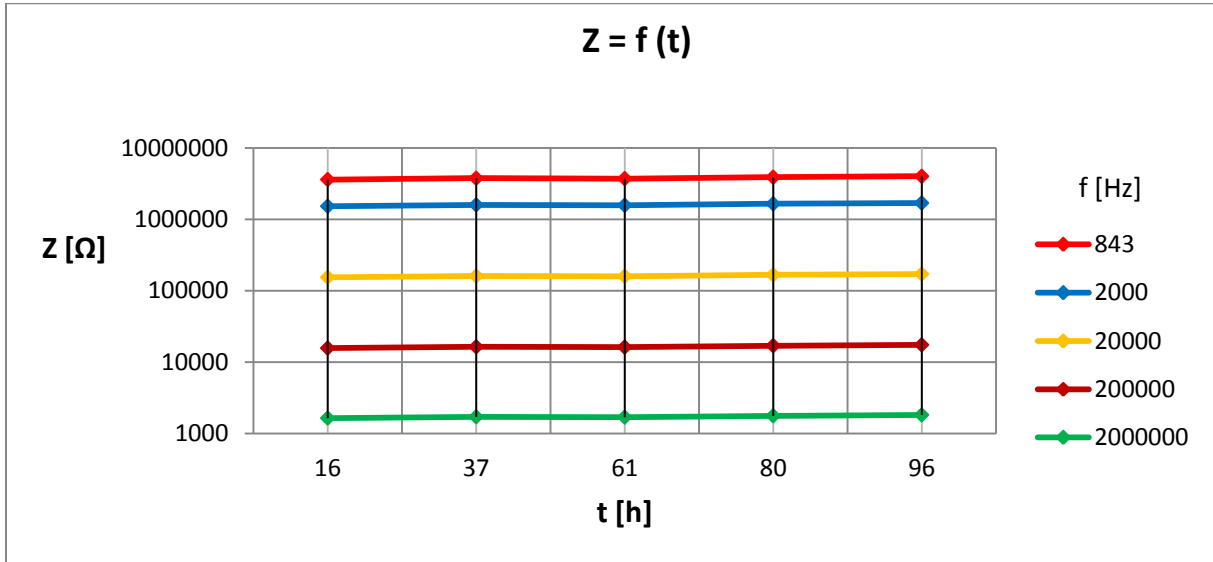
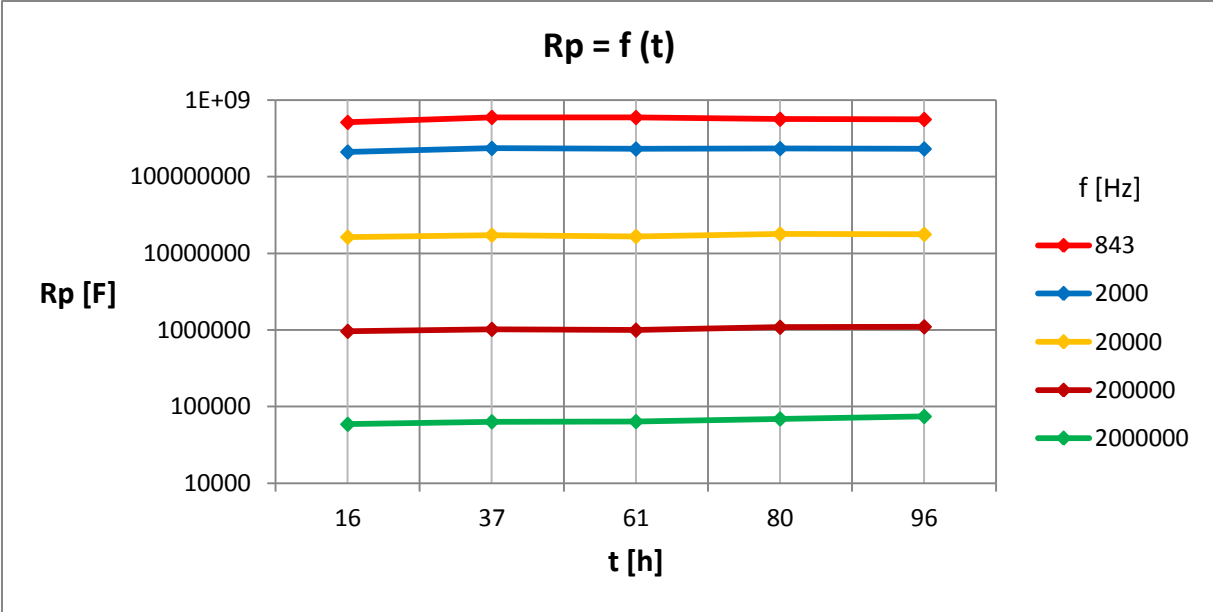


### Příloha 24

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta = 180\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

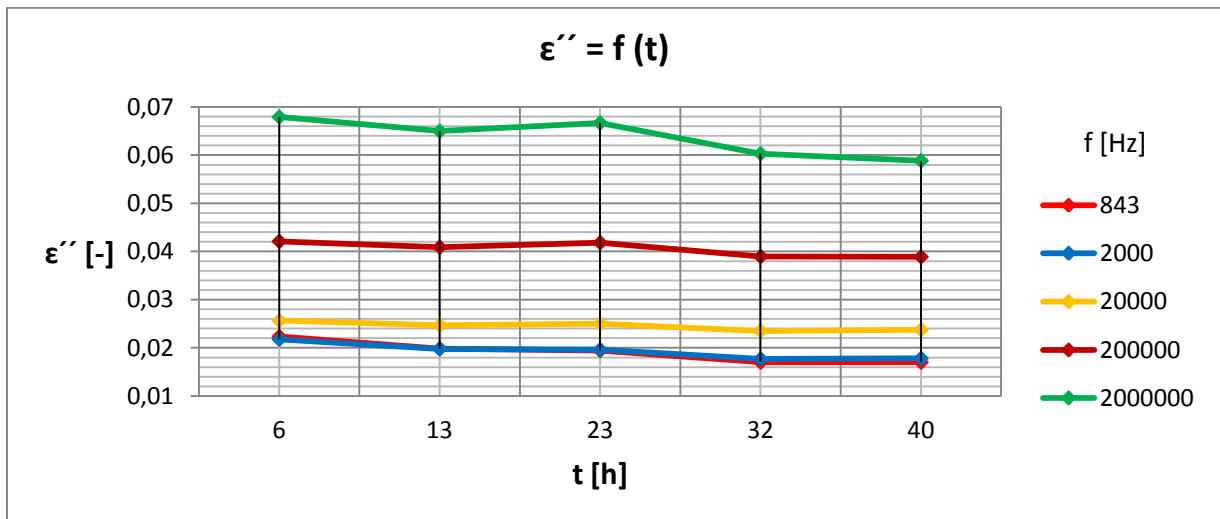
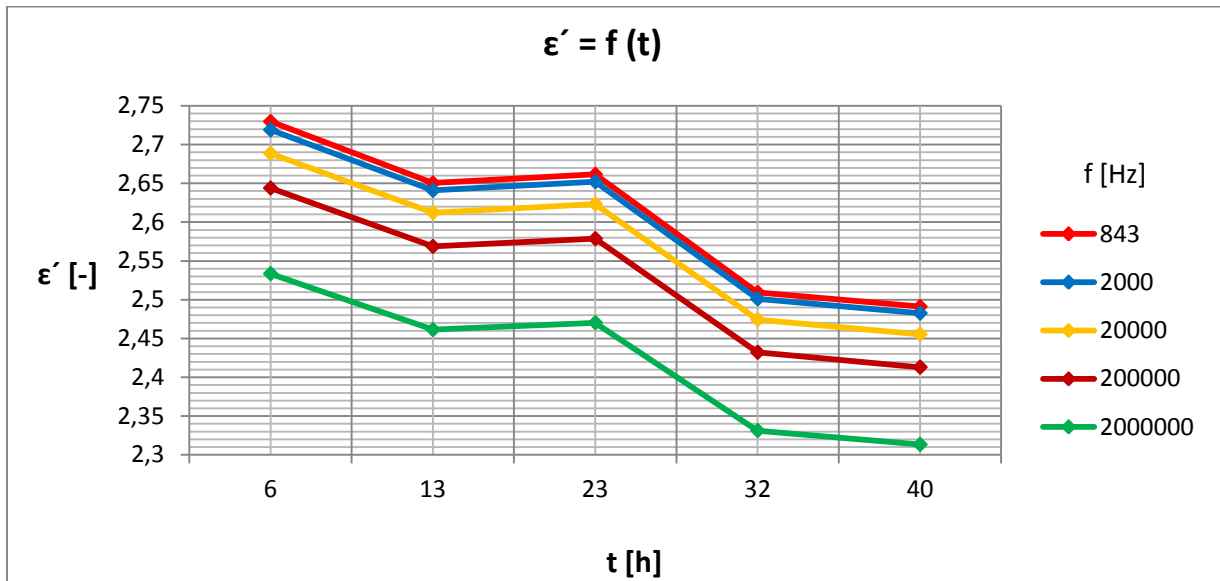




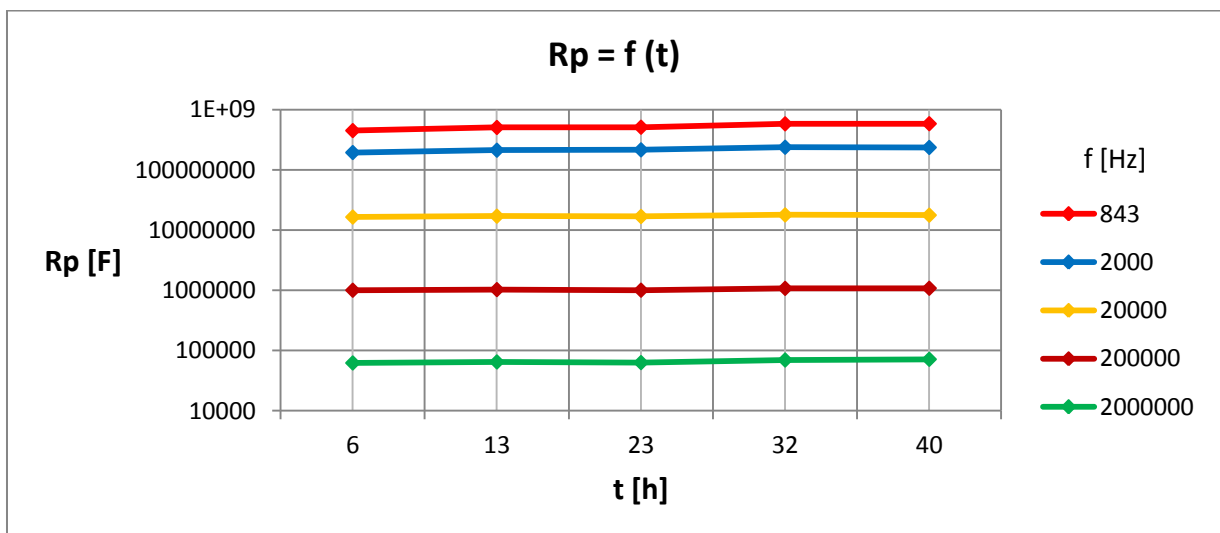
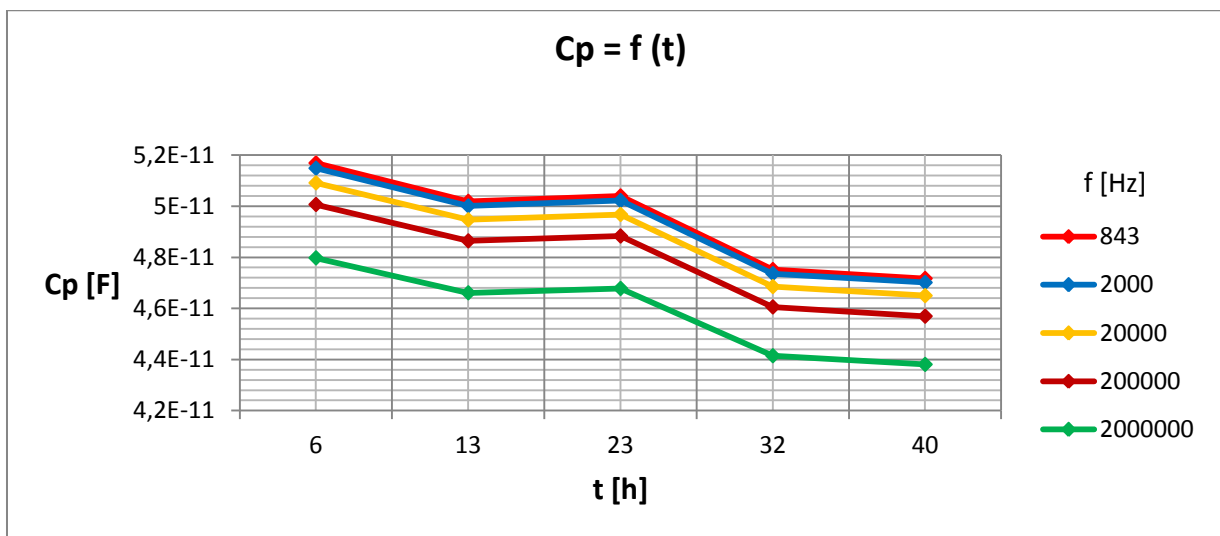
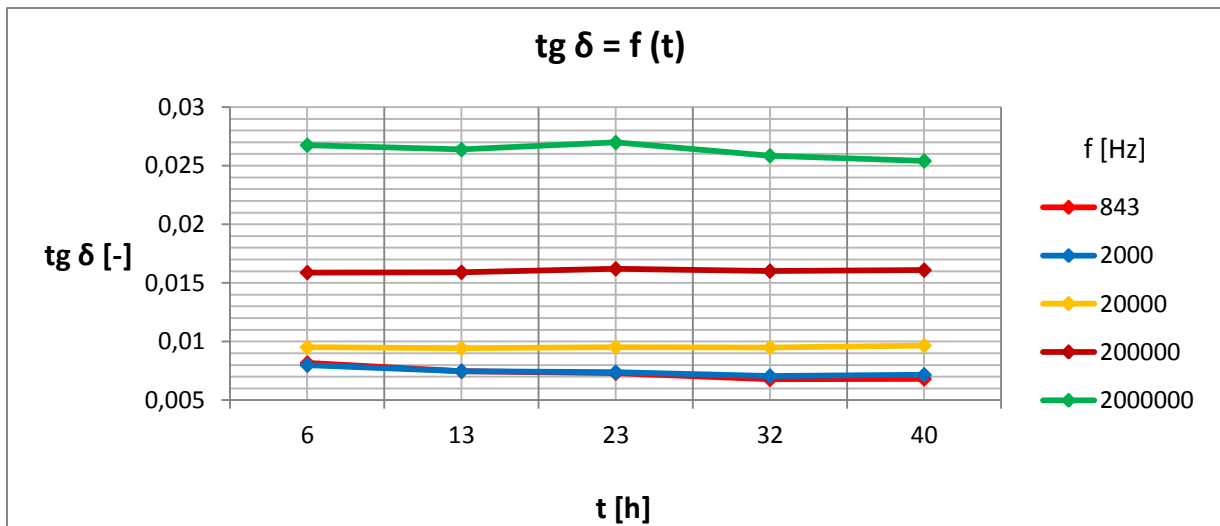


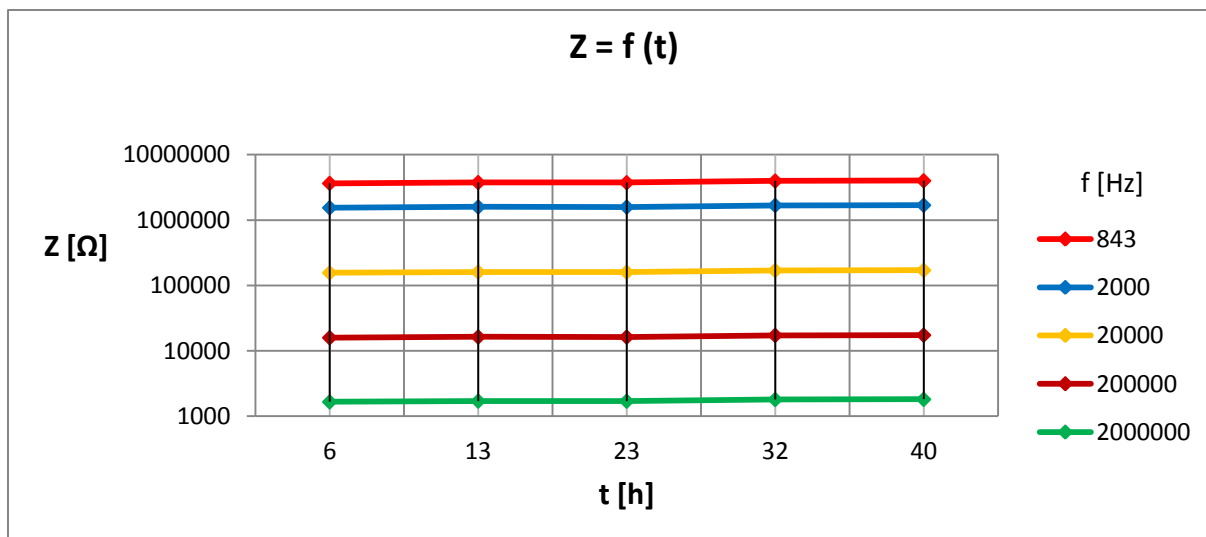
Příloha 25

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta=190\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)



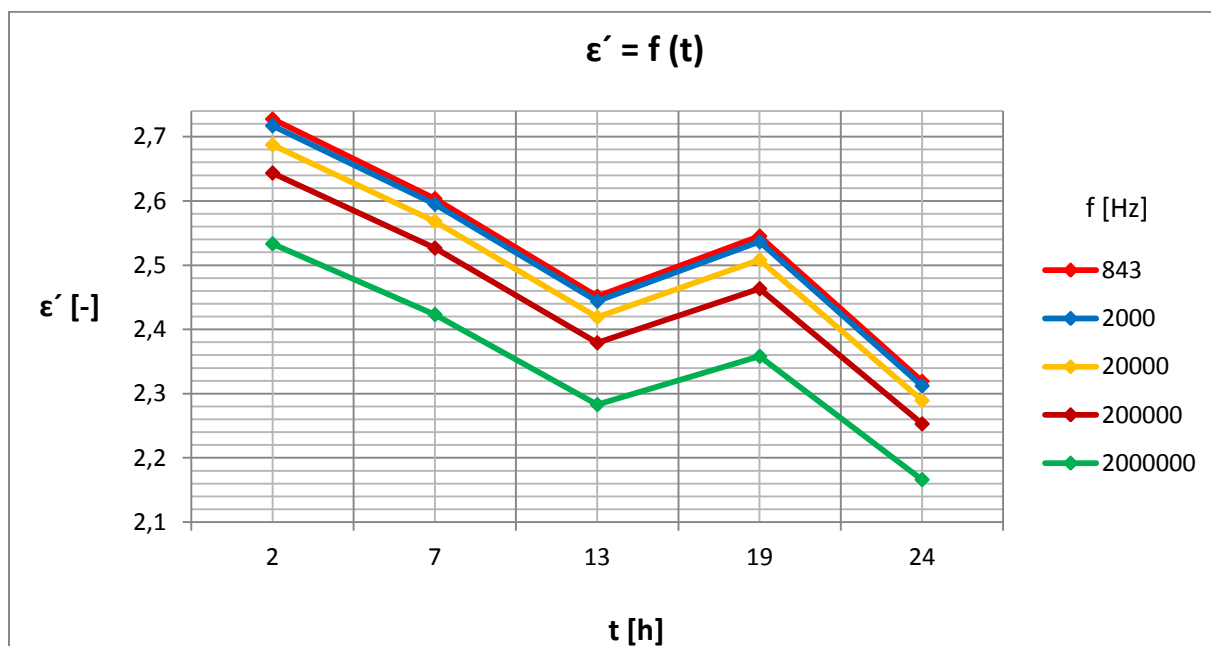


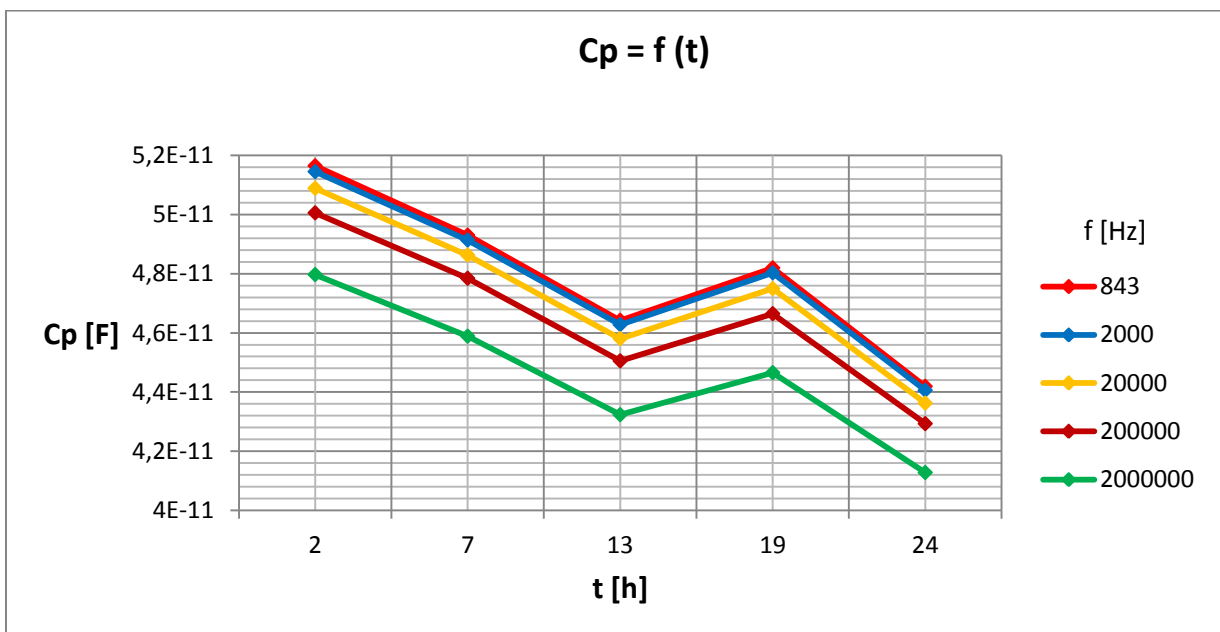
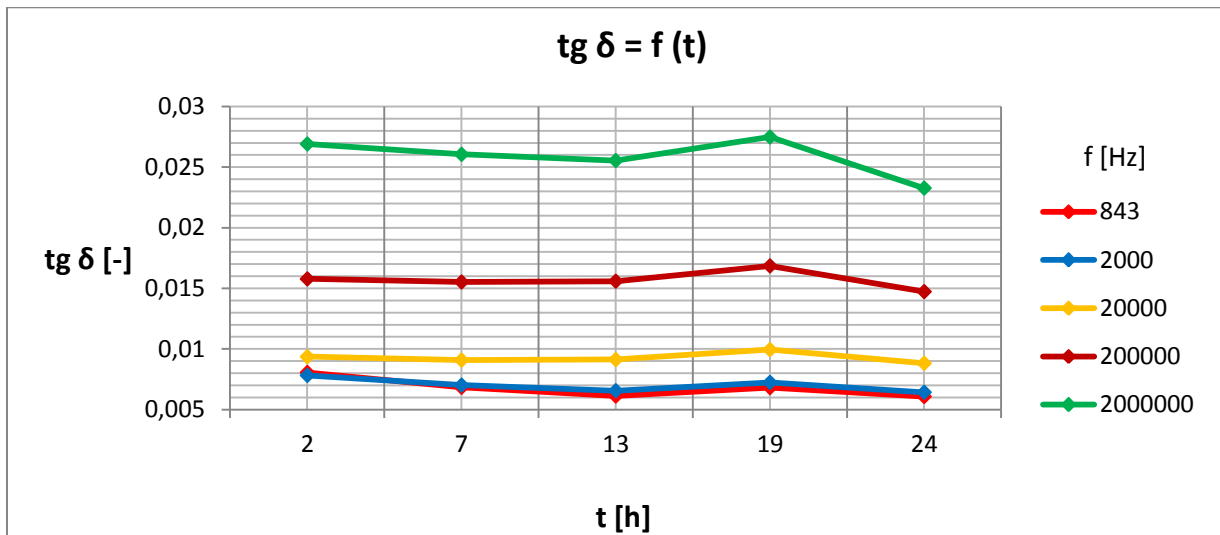
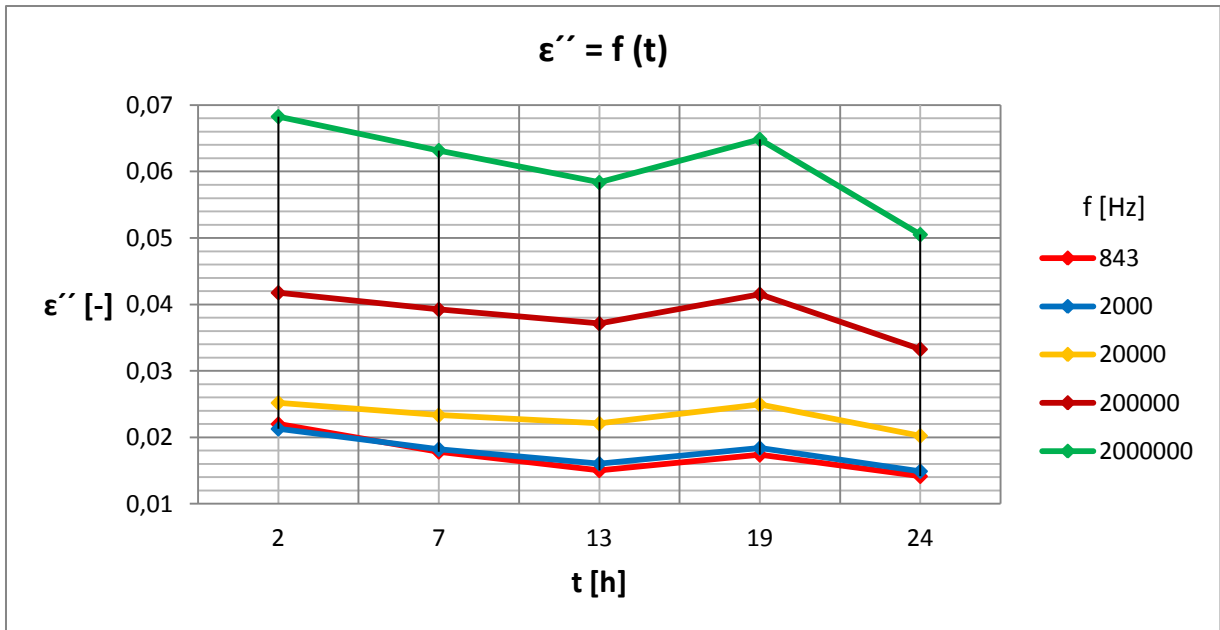


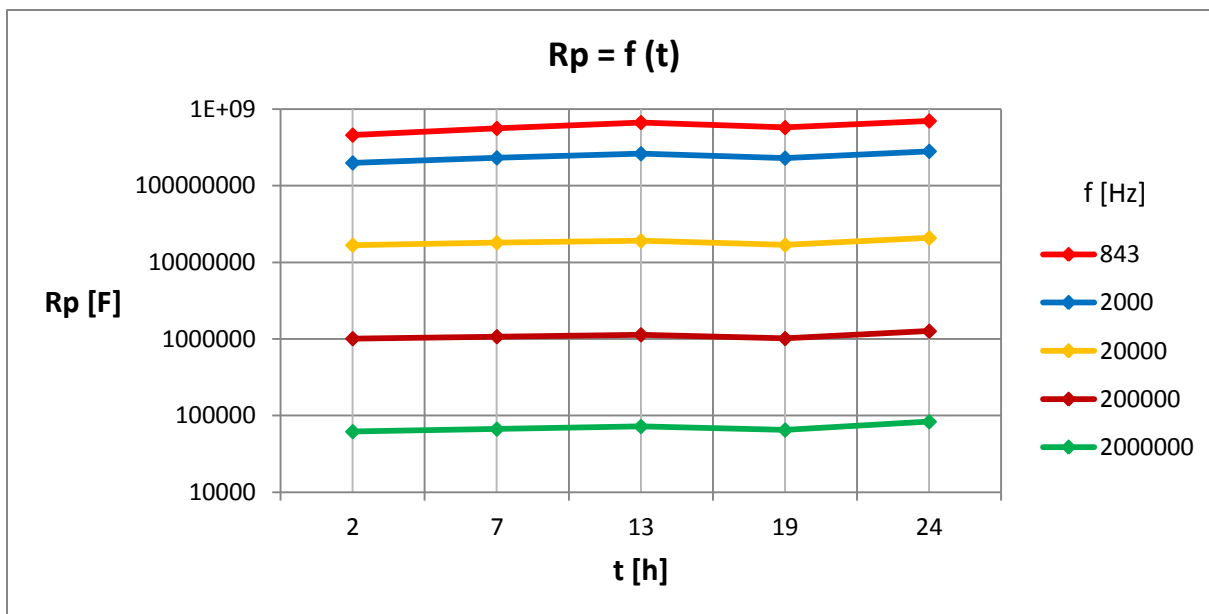


### Příloha 26

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
A	$\vartheta = 200\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

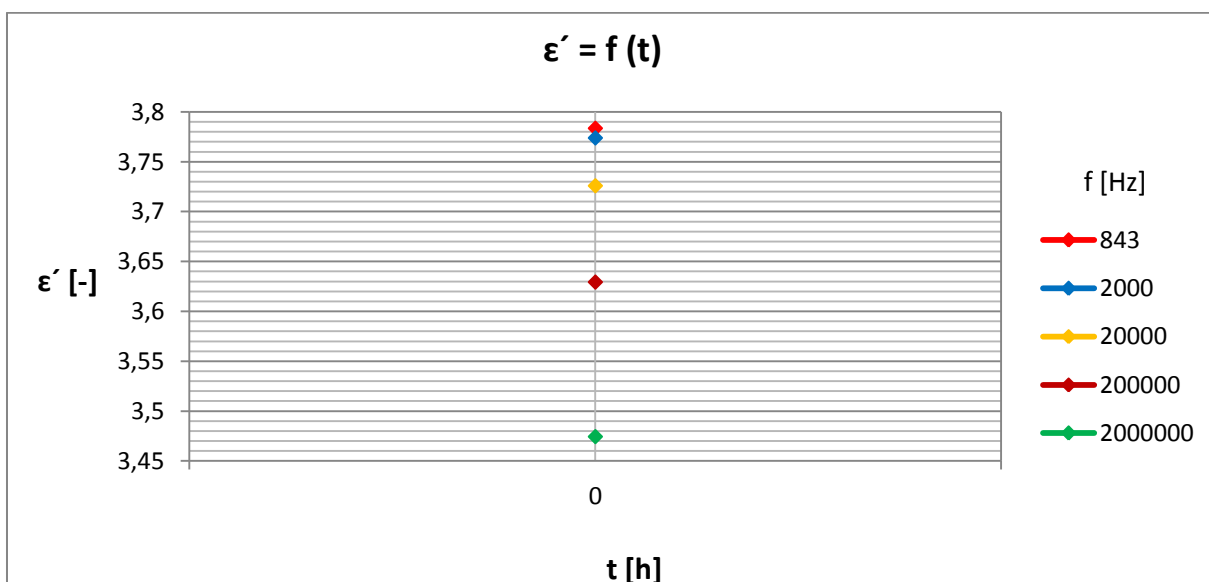


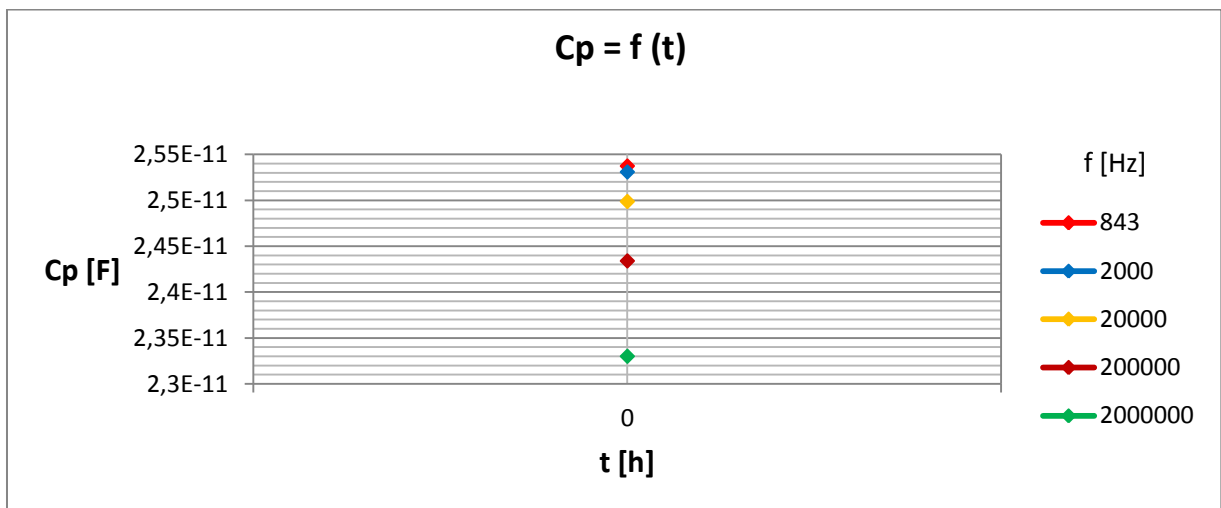
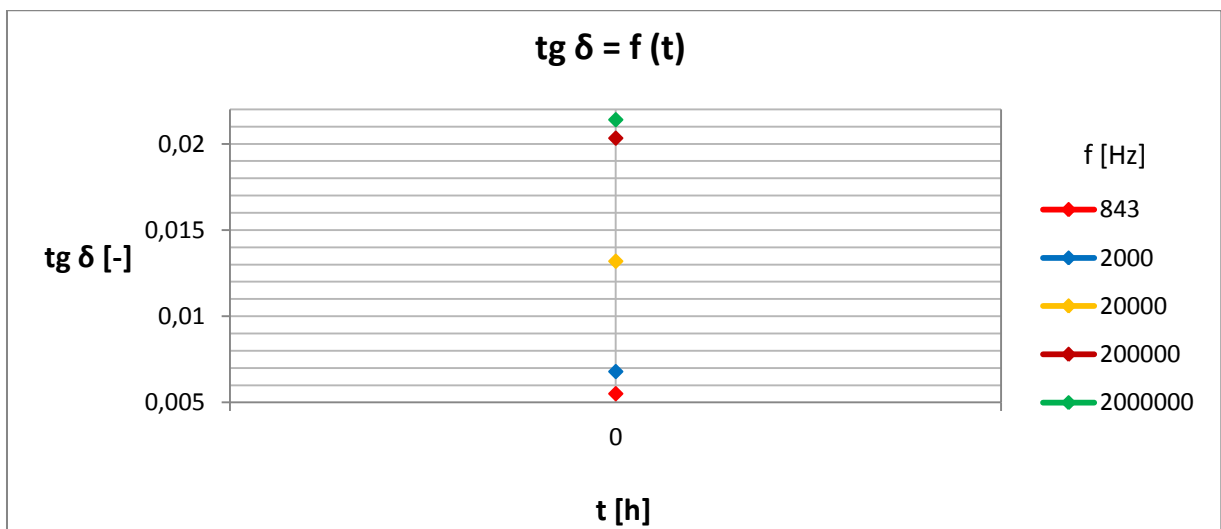
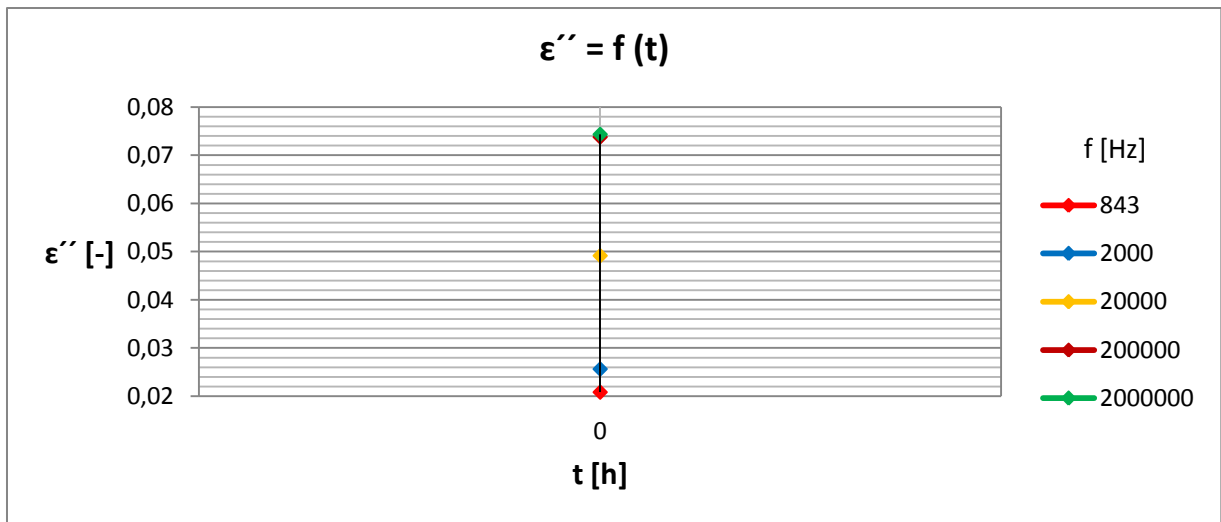


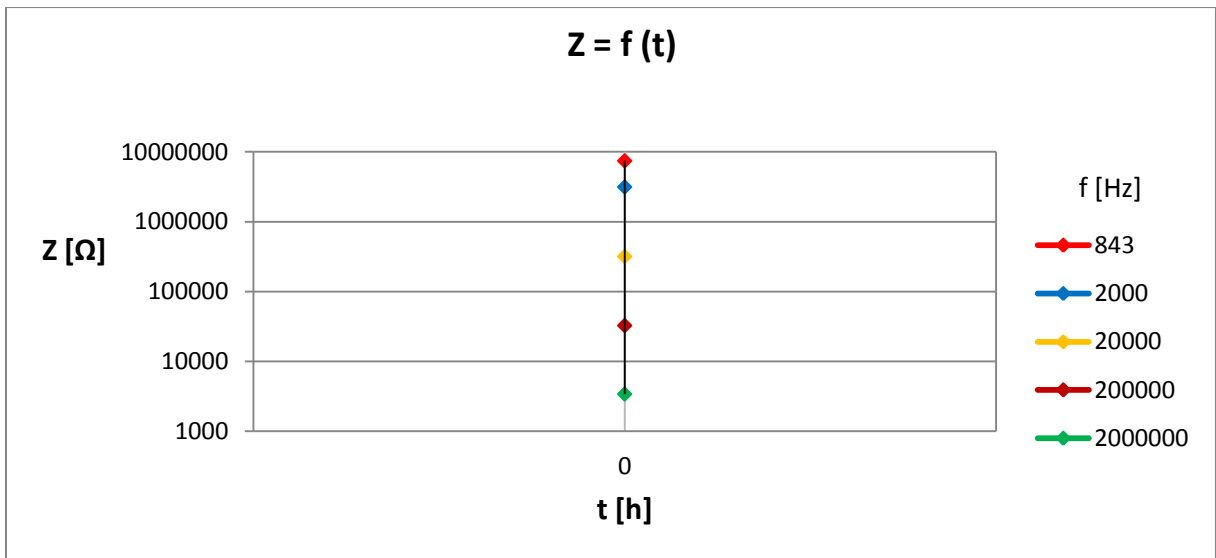
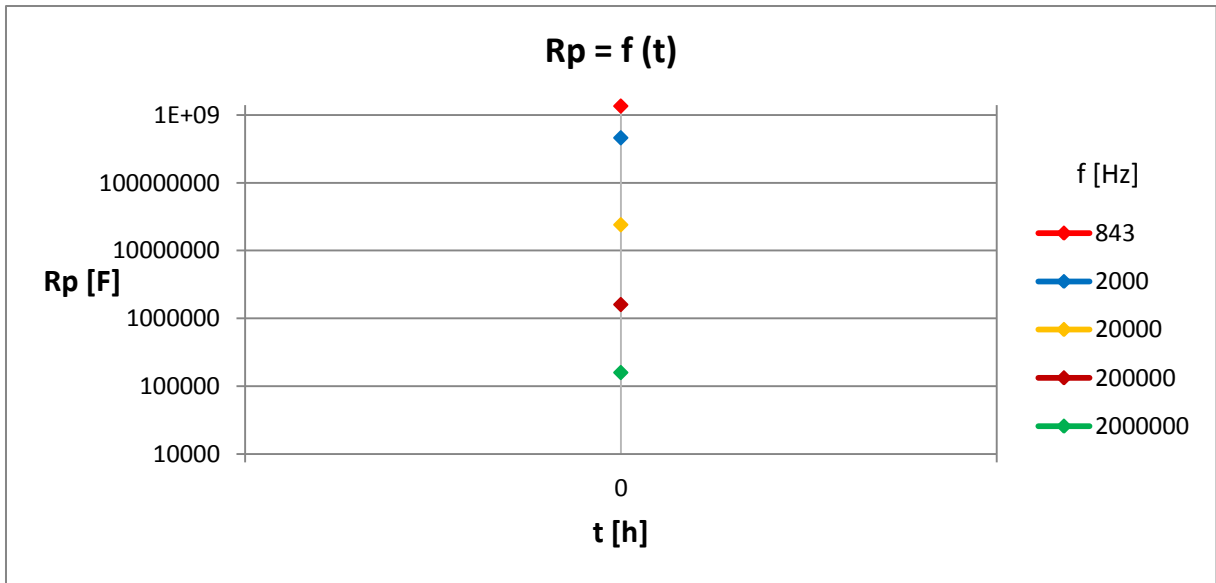


**Příloha 27**

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta = 20$ °C (dodaný stav)	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

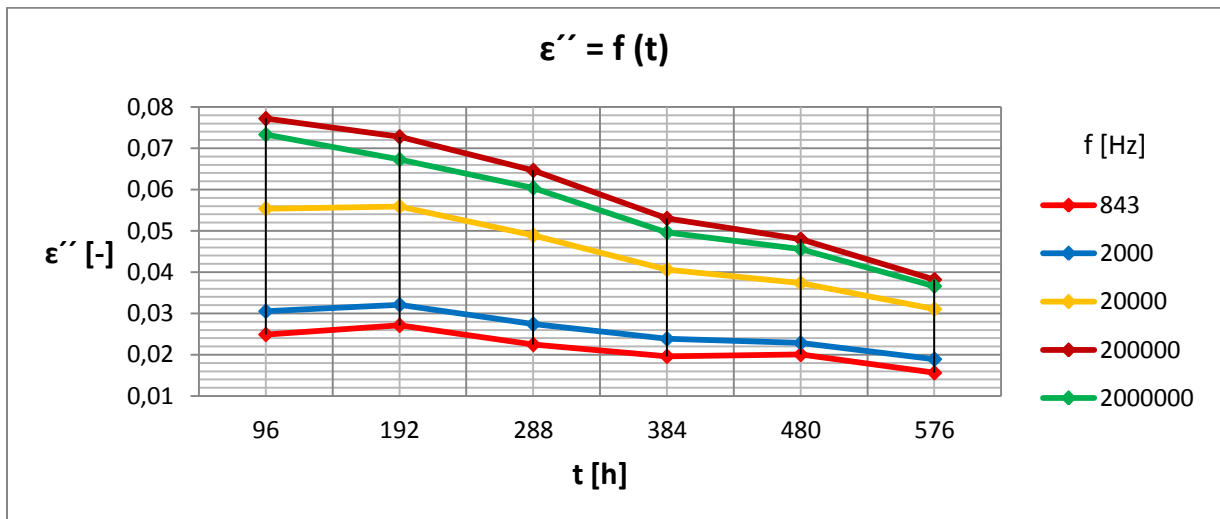
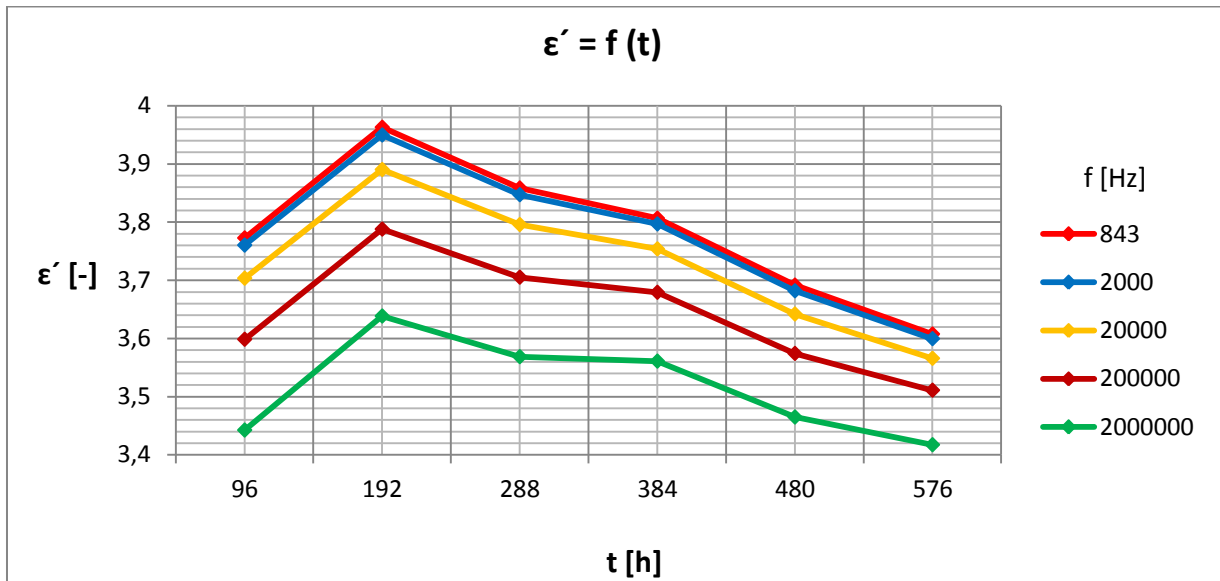


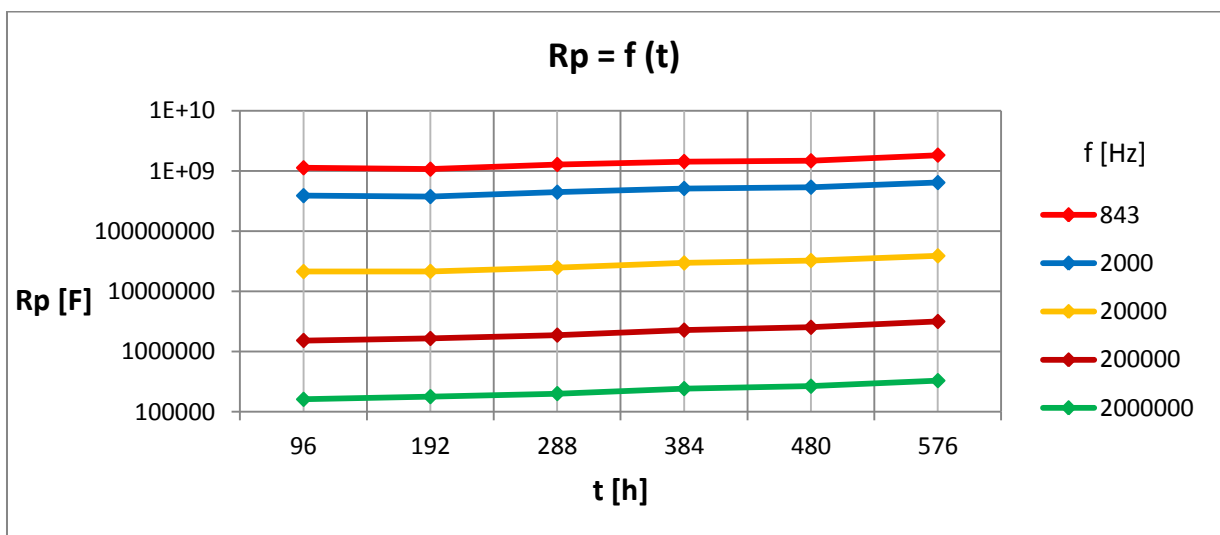
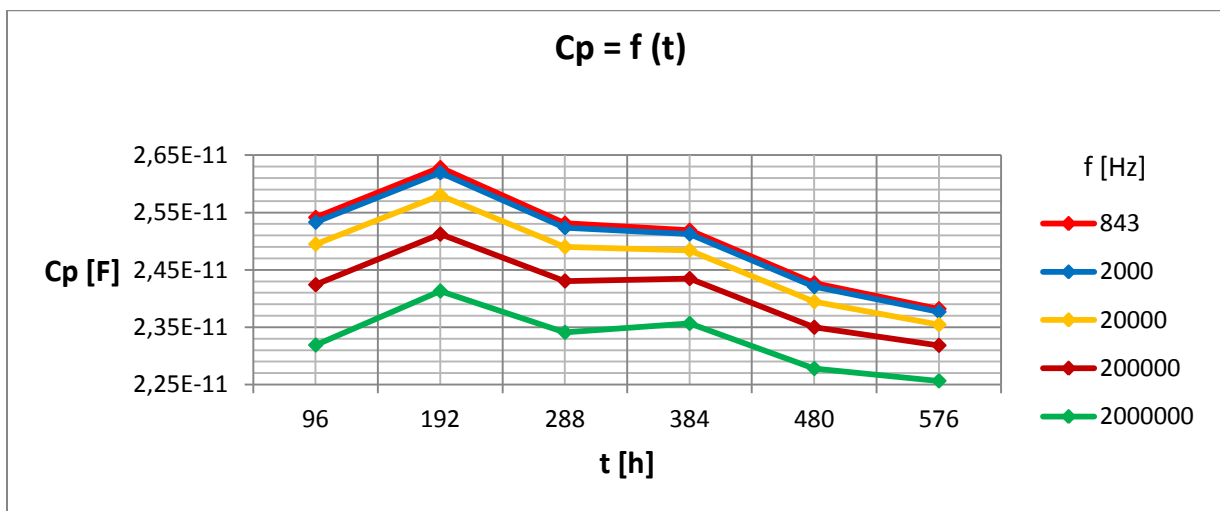
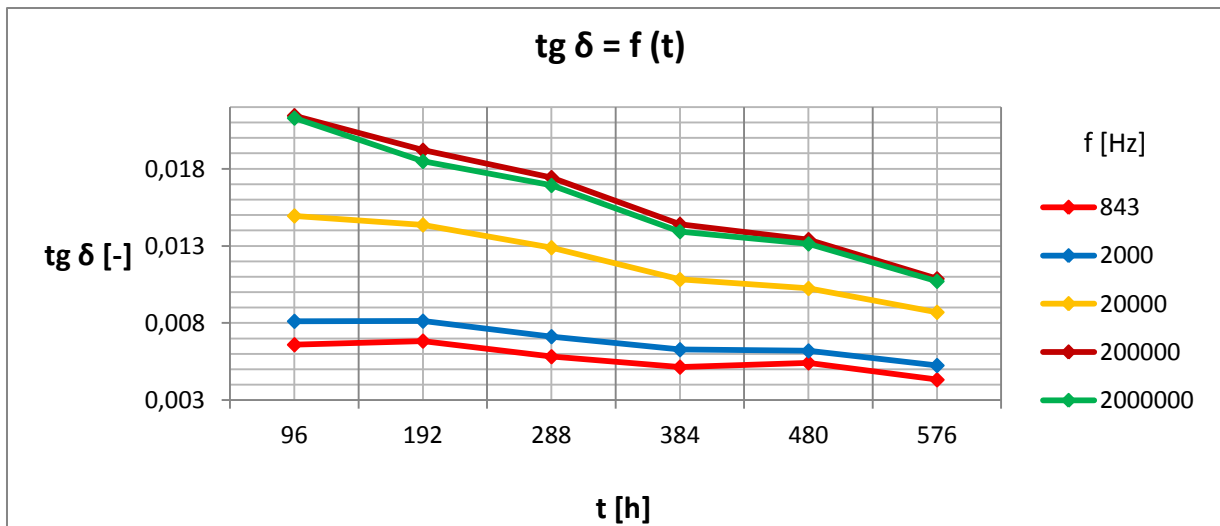




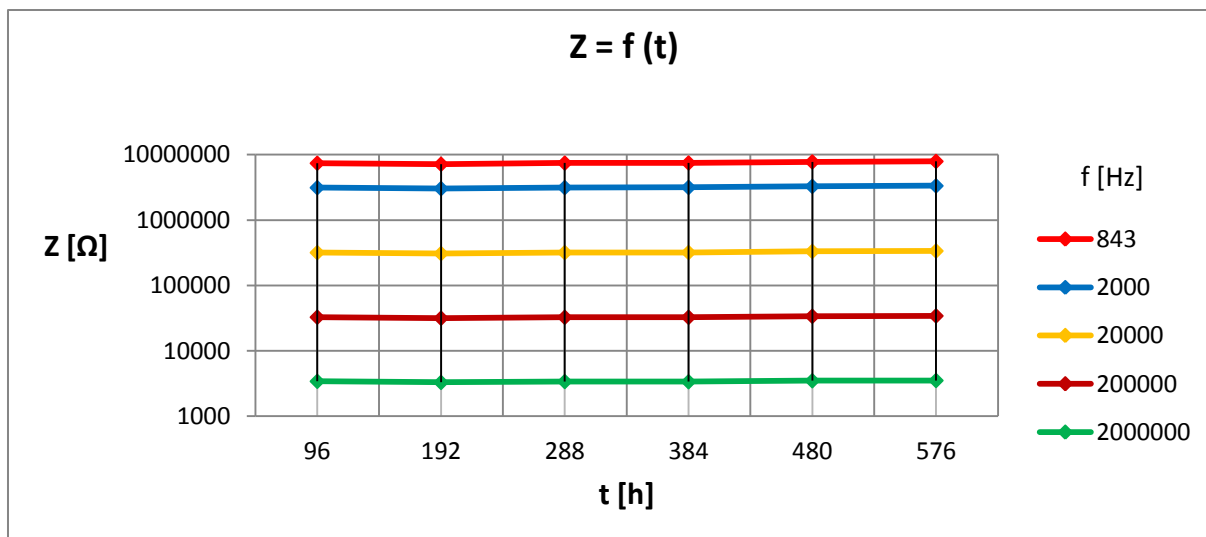
Příloha 28

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=170\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)



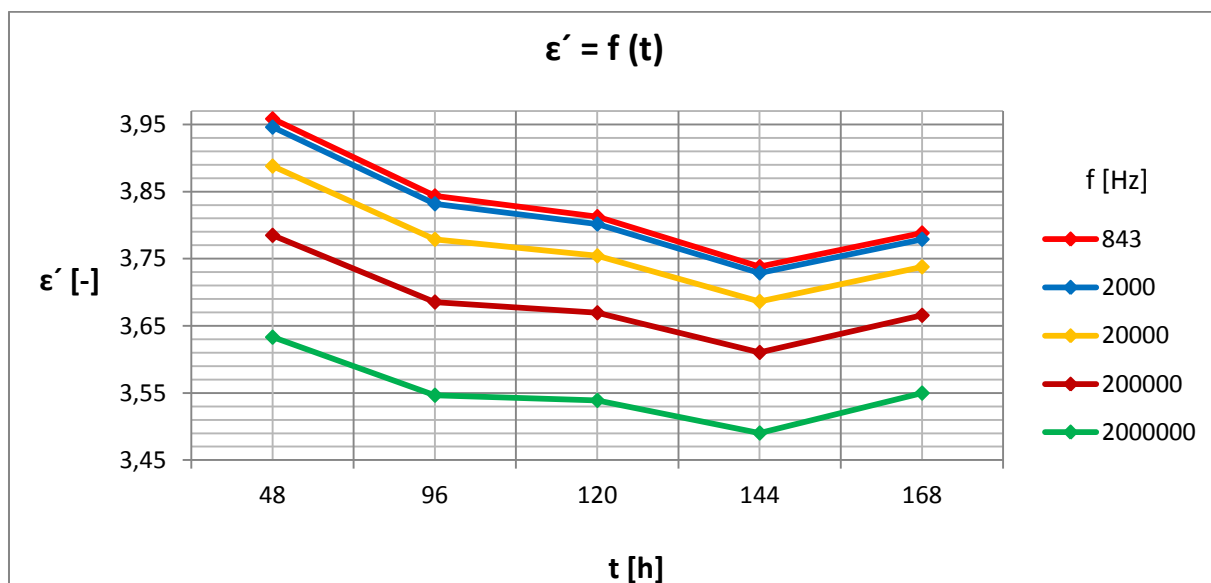


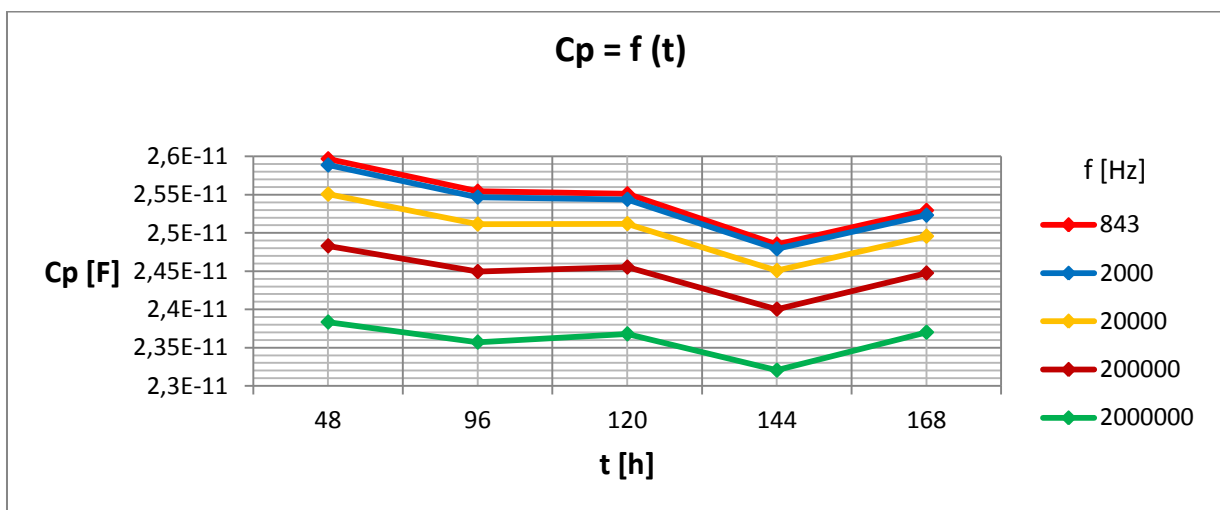
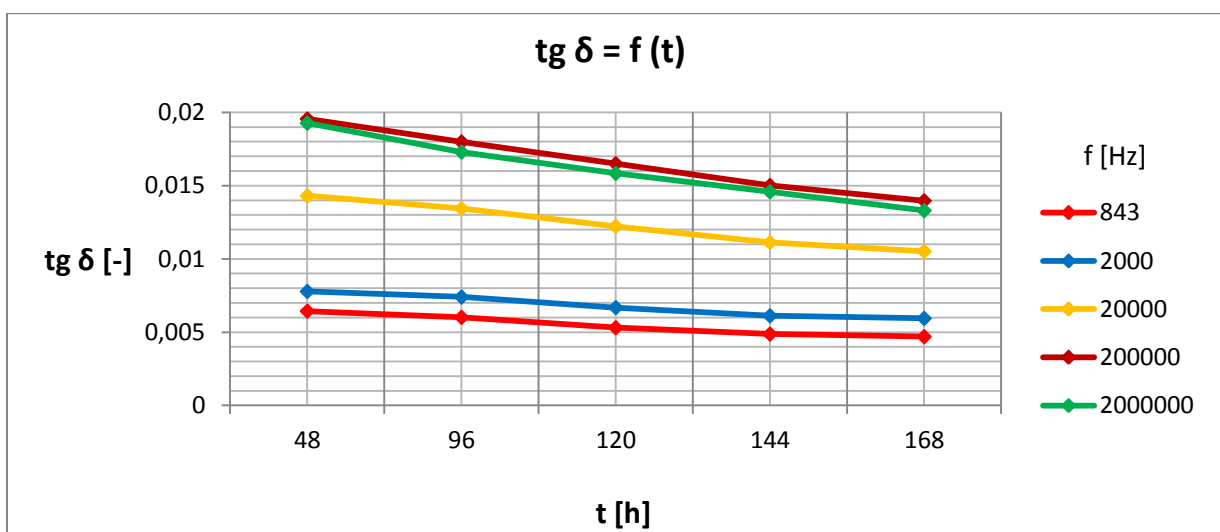
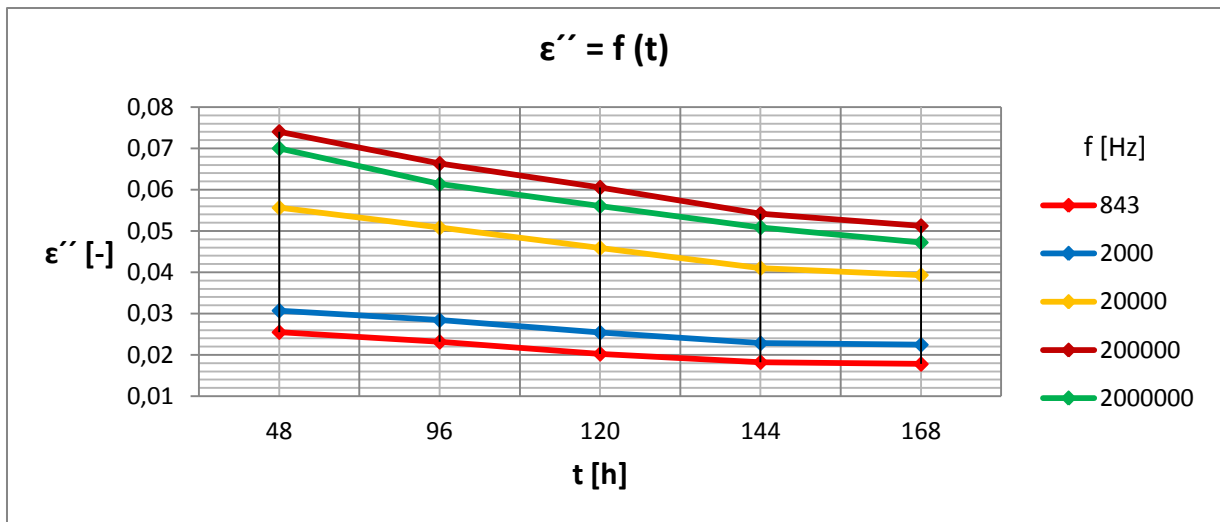


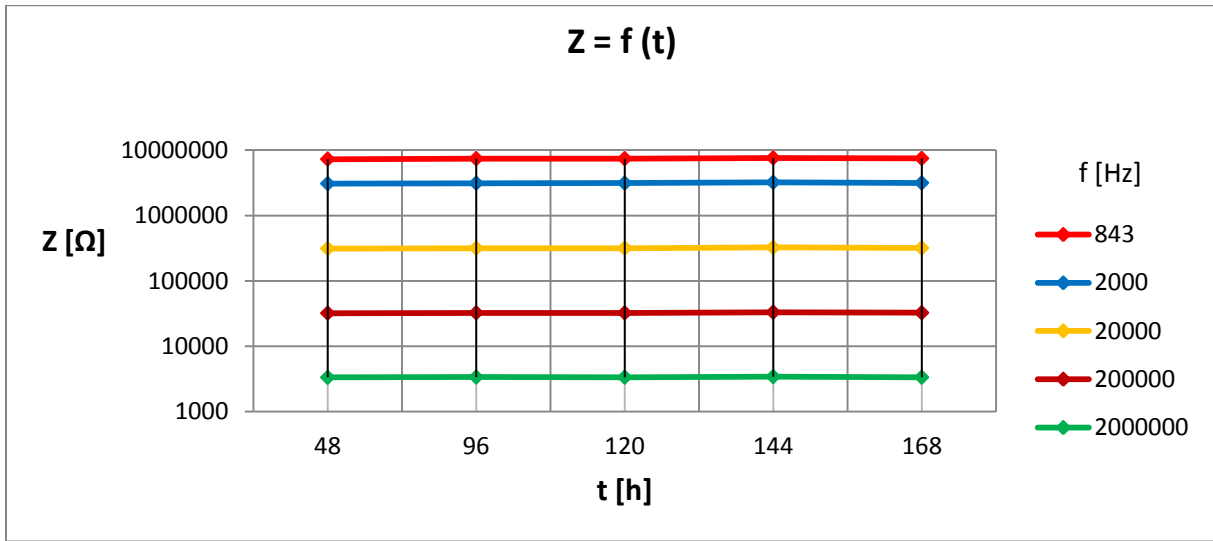
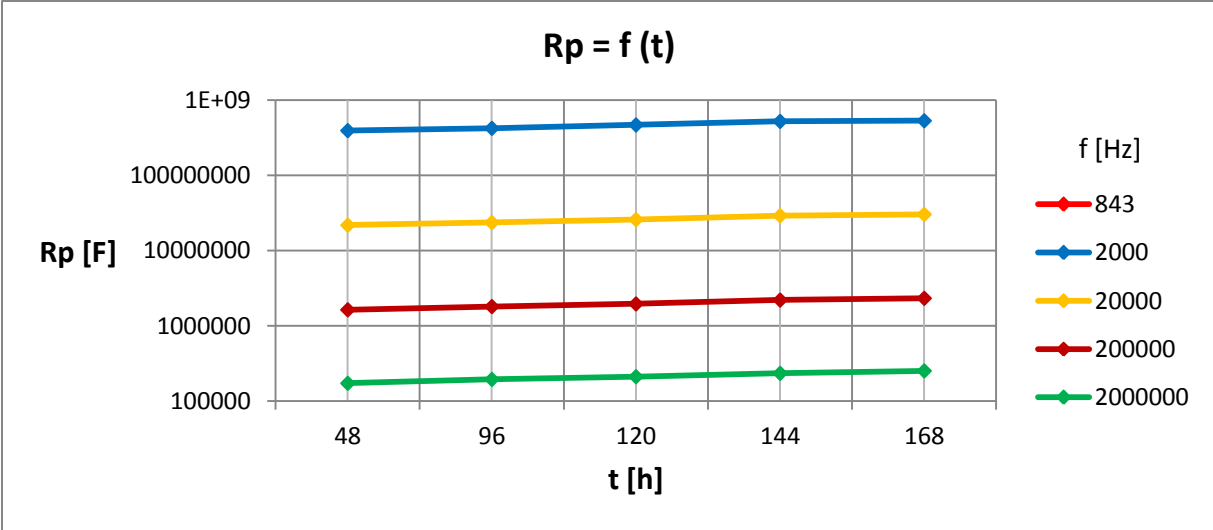


**Příloha 29**

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=180\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

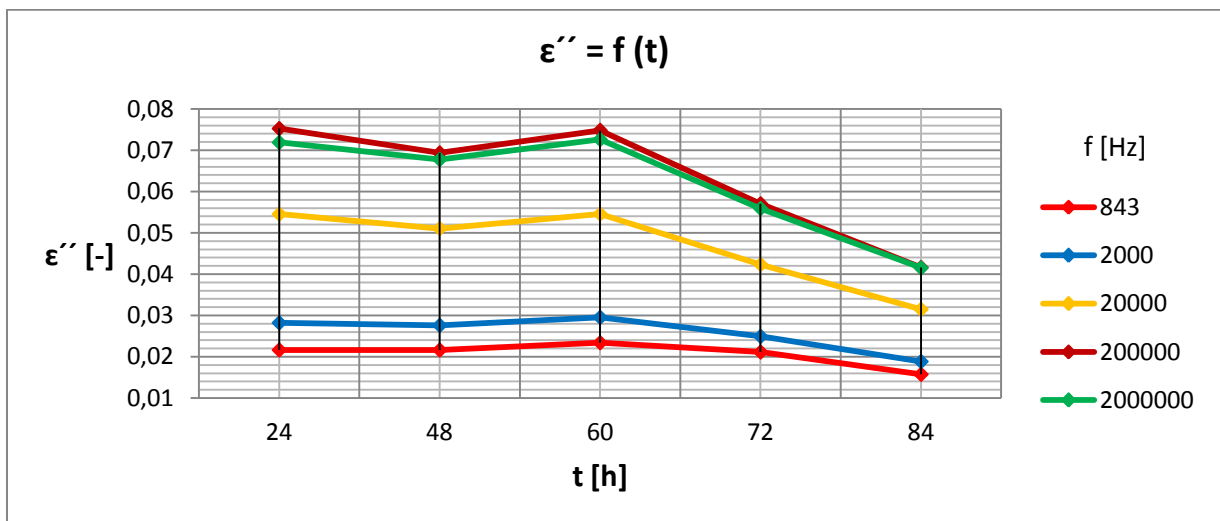
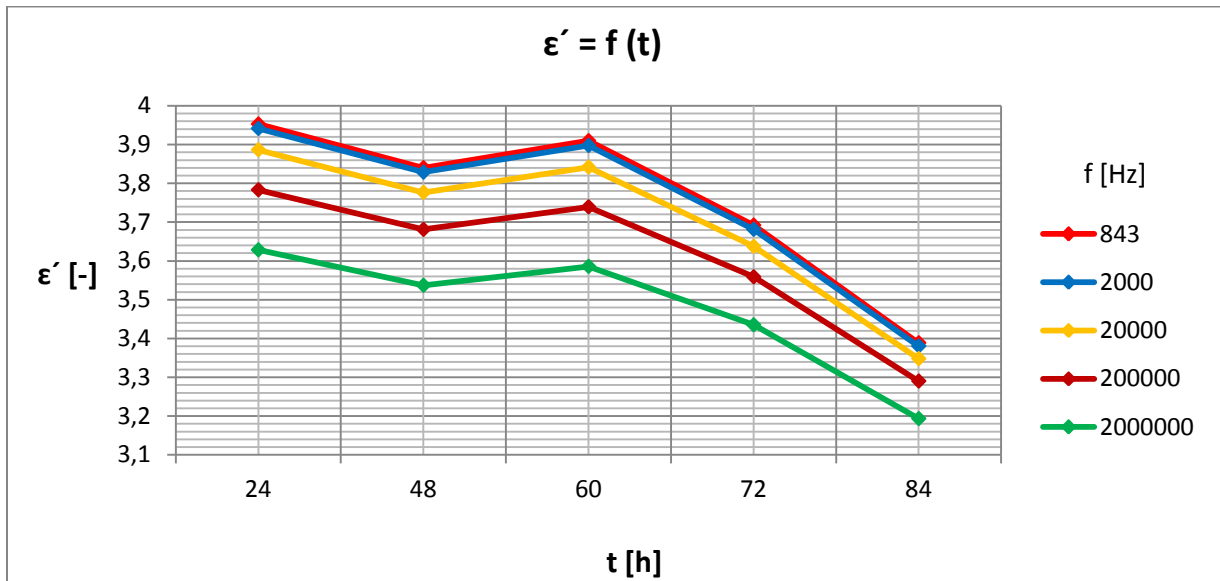


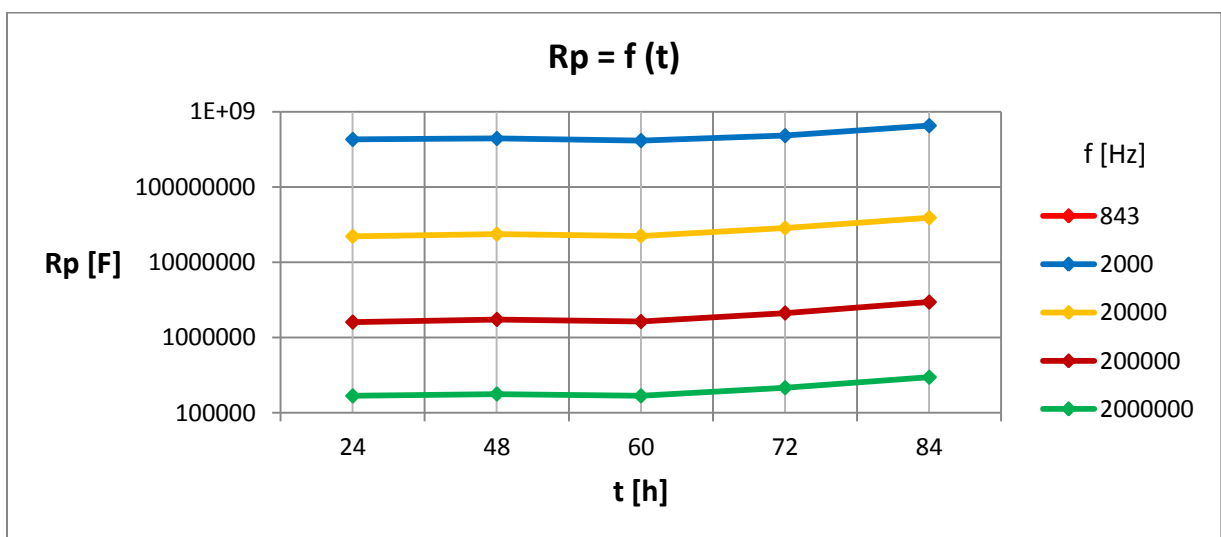
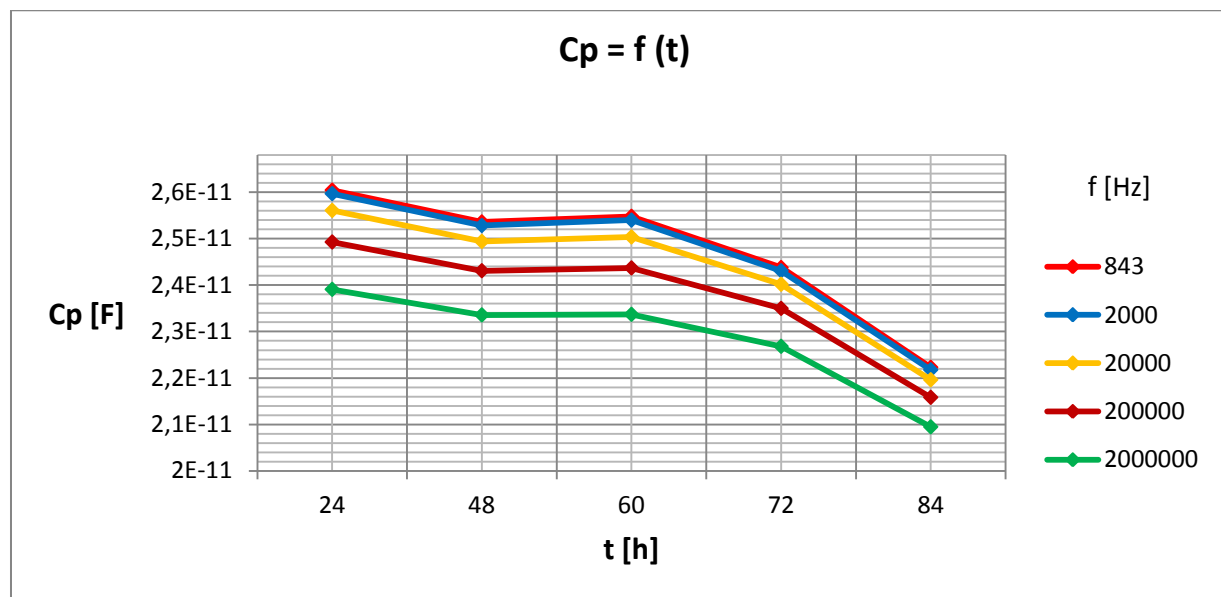
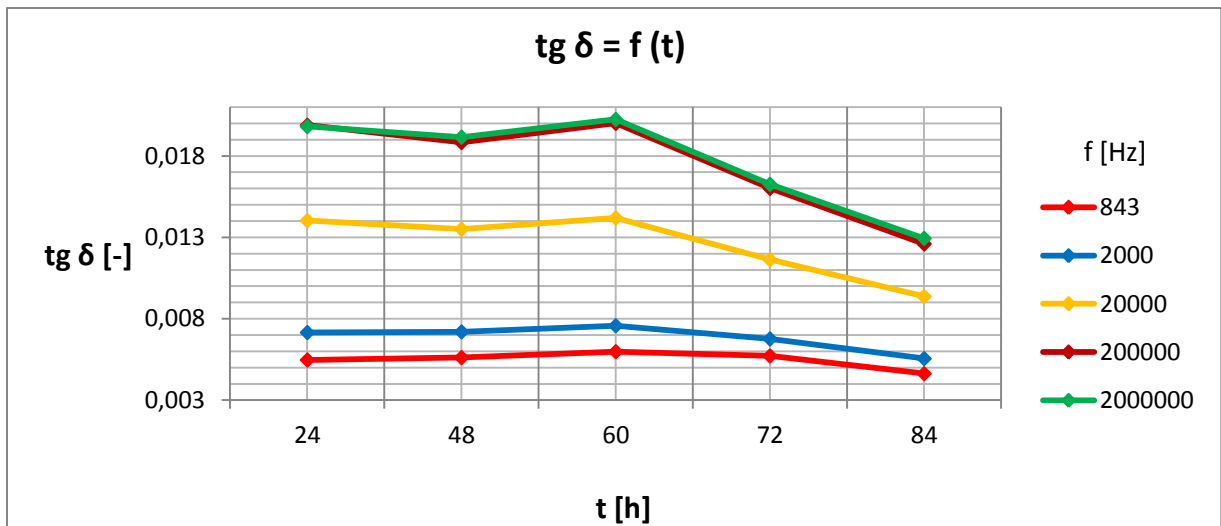


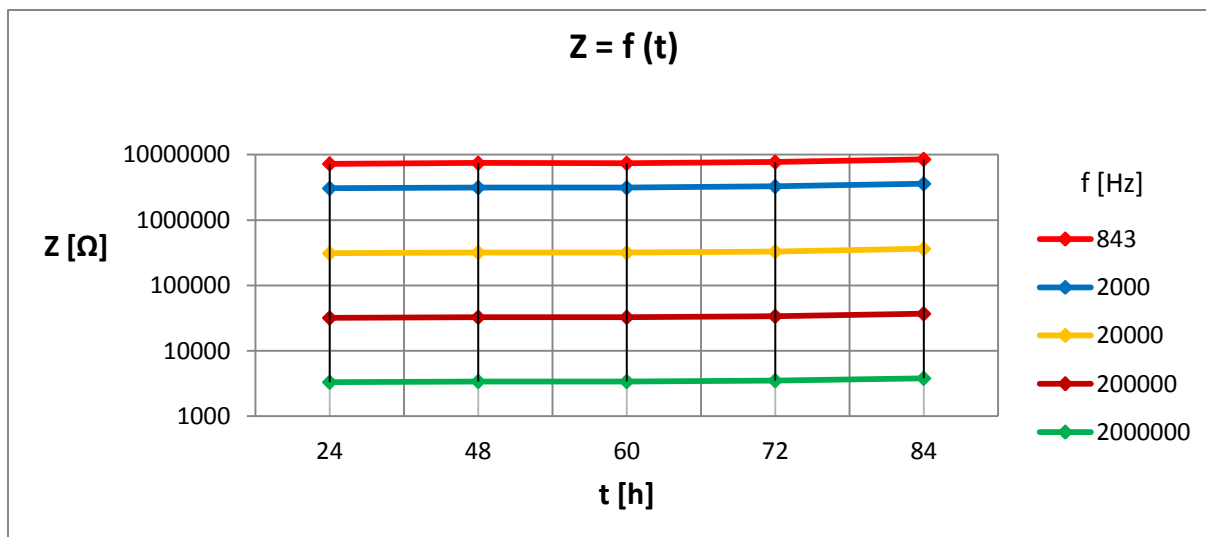


Příloha 30

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta=190\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)







**Příloha 31**

Dielektrické materiály	Teplota stárnutí [°C]	Frekvence [Hz]
B	$\vartheta = 200\text{ °C}$	f = 843 Hz (červená) f = 2000 Hz (modrá) f = 20000 Hz (oranžová) f = 200000 Hz (tma. červená) f = 2000000 Hz (zelená)

