



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

VLIV KOREKČNÍCH ČINITELŮ NA SLOŽKY KOMPLEXNÍ PERMITIVITY

INFLUENCE OF CORRECTION FACTORS ON THE PARTS OF COMPLEX PERMITTIVITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JOSEF HANGYA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Josef Hangya

ID: 83778

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vliv korekčních činitelů na složky komplexní permitivity

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody měření elektrických vlastností dielektrických materiálů ve střídavém elektrickém poli a činitele ovlivňující výslednou přesnost měřených veličin.

Na souboru zkušebních vzorků různých tlouštěk proměřte složky komplexní permitivity ve frekvenční oblasti. Získané výsledky matematicky analyzujte z pohledu druhu použitého elektrodového systému; současně sledujte vliv vzduchové mezery na rozhraní elektroda - materiál. Při výpočtu složek komplexní permitivity proveďte korekci na parazitní jevy podílející se na výsledku. Z realizovaného experimentu zpracujte protokol o zkoušce v souladu s normou ČSN IEC 250.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 3.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt:

Předpokládaná práce se zabývá sledováním složek komplexní permitivity v kmitočtové oblasti při působení střídavého elektrického pole. Dále též činiteli, kteří ovlivňují výslednou přesnost měřených veličin. Předmětem experimentu je vysoko hustotní krystalický polystyren QUINN PS (tloušťky 2mm, 3mm a 6mm), u něhož podle druhu použitého elektrodového systému sledujeme vliv vzduchové mezery na rozhraní elektroda – materiál. Z experimentu je na závěr zpracován protokol o zkoušce podle normy ČSN IEC 250.

Abstract:

This work consider with monitoring components of complex permittivity at frequency section under the action of alternating electric field. Further factors, affecting the final accuracy of measured values. Object of this experiment is crystalline high-density polystyrene QUINN PS (thickness 2, 3 and 6 millimeters), at which according to the type of electrode system, follow the influence of air gap at the interface electrode - material. The experiment is finally finished with a test report according to standards IEC 250.

Klíčová slova:

Dielektrikum, komplexní permitivita, kmitočtová oblast, elektrodový systém, vysoko hustotní krystalický polystyren

Keywords:

Dielectric, complex permitivity, frequency section, electrode system, crystalline high-density polystyrene

Bibliografická citace díla:

HANGYA, J. *Vliv korekčních činitelů na složky komplexní permitivity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 67 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

Prohlášení autora o původnosti díla:

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

V Brně dne 2. 6. 2010

.....

podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdence Rozsivalové, dále pak Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za odborné a metodické vedení, cenné rady, návrhy a připomínky při realizaci této bakalářské práce.

Obsah

ÚVOD	8
1 TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 DIELEKTRICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI	9
1.1.1 Charakteristika dielektrik	9
1.1.2 Dielektrická polarizace	10
1.1.3 Polarizační mechanismy	11
1.2 DIELEKTRIKUM VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI	14
1.2.1 Komplexní permitivita	14
1.2.2 Dielektrické ztráty v pevných izolantech.....	19
1.3 VYUŽITÍ A VLASTNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ.....	26
1.3.1 Faktory ovlivňující dielektrické vlastnosti.....	26
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
2.1 ZKUŠEBNÍ VZORKY	28
2.2 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	35
2.2.1 Měřicí zařízení	35
2.2.2 Elektrodový systém	39
2.3 POSTUP MĚŘENÍ EXPERIMENTU	42
2.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	45
3 ZÁVĚR	59
4 LITERATURA	61
5 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	62
6 PŘÍLOHY	63
6.1 Protokol o zkoušce dle ČSN IEC 250	63

Úvod

K diagnostice vlastností materiálů je možno použít mnoha nedestruktivních i destruktivních metod. Jedna z nedestruktivních metod je dielektrická relaxační spektroskopie (DRS), kterou lze použít ke studiu různých materiálových soustav. DRS je metoda na rozhraní fyziky, chemie a materiálového inženýrství; používá se ve frekvenční a časové oblasti.

Pod pojmem dielektrické vlastnosti se skrývají dva veledůležité materiálové parametry: relativní permitivita a ztrátový činitel. Pomocí nich jsou látky, přesněji řečeno nevodiče, hodnoceny mezi sebou a vybírány pro odpovídající praktické aplikace.

V předložené práci jsou ve frekvenční oblasti (20Hz – 2MHz) při působení střídavého elektrického pole sledovány složky komplexní permitivity krystalického polystyrenu a dále též parazitní jevy, ovlivňující výslednou přesnost měření. Konkrétně je ve standardním prostředí za pomoci třítodového elektrodového systému Agilent 16451B zkoumán materiál QUINN PS od společnosti Quinn plastics.

1 Teoretická část

1.1 Dielektrické materiály a jejich vlastnosti

1.1.1 Charakteristika dielektrik

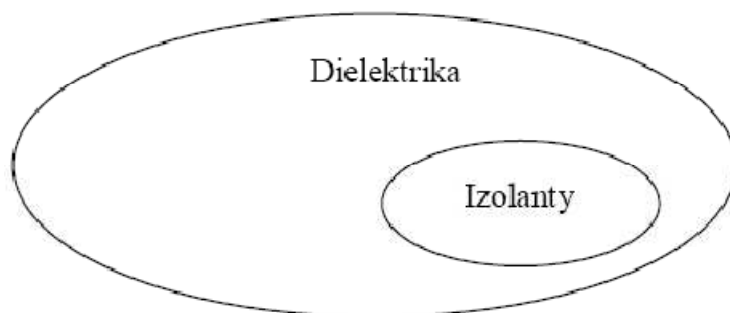
Dielektrikum je látka, která se skládá z atomů, molekul a iontů. Za ideální dielektrikum se považuje látka, která je složená výhradně z nábojů vzájemně vázaných elektrostatickými silami a neobsahující volně pohyblivé elektrické náboje. Elektroizolační látky, běžně používané v elektrotechnické praxi, však obsahují malá množství volných nábojů (elektronů, kladných a záporných iontů), které se působením vnějšího elektrického pole mohou v látce pohybovat. Reálné dielektrikum je tedy v nepatrné míře vodivé. Proto i v slabém elektrickém poli jím protéká malý, nikoliv však zanedbatelný, proud.

Dielektrikum se používá ve vztahu s polarizovatelností částic a následně se schopností látky akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii (kondenzátor).

Každý izolant je současně dielektrikem, avšak všechna dielektrika nejsou izolanty. Tuto skutečnost je schematicky znázorněna na obr. 1. K dielektrikům se řadí i čttné látky s vlastnostmi polovodičů (Ge, Si).

Po přiložení elektrického pole se v dielektriku vyskytují tyto fyzikální jevy:

- dielektrická polarizace (pohyb vázaných elektrických nábojů)
- elektrická vodivost (pohyb volných elektrických nábojů)
- dielektrické ztráty
- elektrický výboj



Obr. 1 Vztah mezi dielektriky a izolanty [5]

Chování dielektrik v elektrickém poli je charakterizováno základními elektrickými veličinami uvedenými v Tab. 1.

Tab. 1 Základní elektrické veličiny dielektrika [9]

Název	Označení
relativní permitivita	ϵ'
vnitřní rezistivita	ρ_v
povrchová rezistivita	ρ_P
ztrátový činitel	$tg \delta$
elektrická pevnost	E_P

1.1.2 Dielektrická polarizace

Dielektrickou polarizací se rozumí děj, který pobíhá v dielektriku po jeho vložení do elektrického pole. Struktura a stavba daného dielektrika rozhoduje o tom, jak bude polarizace probíhat. Většinou probíhá v látce současně více polarizací, což je dáno jejím vnitřním uspořádáním. Výsledný průběh polarizace je dán superpozicí jednotlivých polarizačních mechanismů.

Základní fyzikální vlastností dielektrik je polarizovatelnost α , která vyjadřuje schopnost polarizace látky. Se samotnou polarizovatelností úzce souvisí hodnota relativní permitivity ϵ' , ztrátového činitele $tg \delta$, jejichž vzájemný součin je úměrný dielektrickým ztrátám.

Po vložení dielektrika do elektrického pole na každou částici látky působí, kromě vnějšího (makroskopického) elektrického pole, rovněž pole sousedních polarizovaných částic. Výsledná intenzita elektrického pole je dána součtem těchto složek elektrického pole a nazývá se intenzita lokálního elektrického pole. Velikost indukovaného elektrického momentu jedné polarizované částice je úměrná intenzitě lokálního elektrického pole \vec{E}_{lok} , kde platí

$$\vec{\mu}_i = \alpha \vec{E}_{lok} \quad (1)$$

Vektor polarizace je úměrný \vec{E}_{lok} , protože koncentrace částic n v jednotkovém objemu dielektrika nezávisí na intenzitě elektrického pole a je dána vztahem

$$\vec{P} = n \alpha \vec{E}_{lok} \quad (2)$$

Další veličinou popisující elektrické jevy v dielektriku je elektrická indukce \vec{D} , která je charakterizována vztahem

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3)$$

kde ε_0 je absolutní permitivita vakua, \vec{E} je intenzita elektrického pole mezi deskami vakuového kondenzátoru.

Vektor polarizace \vec{P} je závislý na intenzitě elektrického pole \vec{E}_0 , jak vyjadřuje následující vztah

$$\vec{P} = \kappa \varepsilon_0 \vec{E}_0 \quad (4)$$

kde $\kappa = (\varepsilon_r - 1)$ je dielektrická susceptibilita.

1.1.3 Polarizační mechanismy

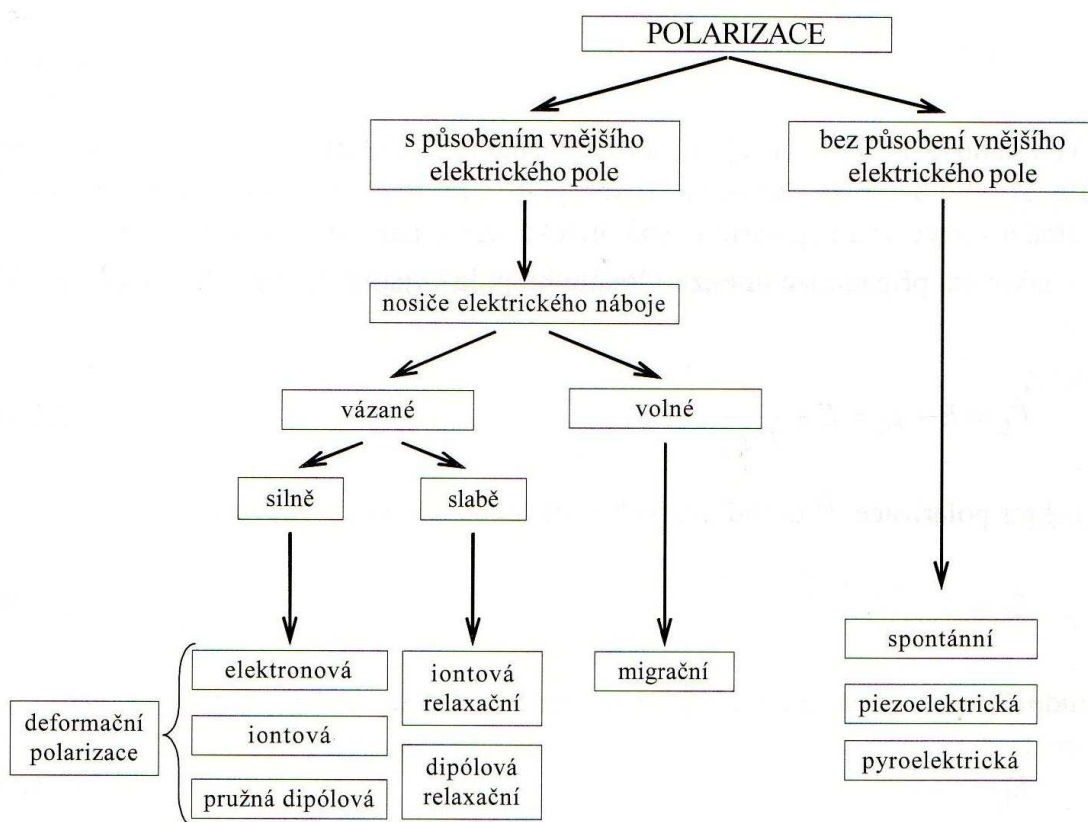
V dielektrických materiálech se vyskytuje několik typů mechanismů polarizace dielektrik. Každá polarizace se vyznačuje projevem určitých vlastností, které souvisí se strukturou látky a chemickým složením. Na základě chování látek v elektrickém poli se rozlišují různé mechanismy polarizace dielektrika. Nejčastější rozdělení polarizačních mechanismů je uvedeno na obr. 2.

Deformační polarizace

Nosičem elektrického náboje při těchto polarizacích je iont, elektron nebo i stálý dipól (přítomný přímo ve struktuře látky díky její struktuře a stavbě). Nosič náboje je pevně držen v atomu, molekule, nebo krystalu. Vnější elektrické pole jej může pouze z jeho rovnovážné polohy na zcela minimální vzdálenost posunout. Tato vzdálenost je například u elektronové polarizace menší než rozměry samotného atomu. Výsledné ovlivnění relativní permitivity dielektrika může být velké. V dielektriku dochází k posunutí velkého množství nosičů, i když u deformačních polarizací dochází pouze k malému posunutí nosičů náboje. Po skončení působení elektrického pole dochází velmi rychle k navrácení nosičů do základních poloh, což

má za příčinu velice krátké časy ustálení polarizace, stejně tak jako i pevná vazba. Díky této pevné vazbě částic zúčastňujících se polarizačních dějů neovlivňuje pohyb nosičů vyvolaný elektrickým polem jejich tepelný pohyb. Dále není závislá na tlaku, nebo frekvenci, a to vše v případě, že se jedná o takové hodnoty teplot a tlaků, které nemají za následek rozrušení látky nebo fázové přeměny - spojené se změnou struktury. Deformační polarizace jsou bezetrátové a s tím souvisí pevnost vazby nosičů náboje [5].

Do skupiny deformačních (pružných) polarizací patří polarizace *iontová*, *elektronová* a *polarizace pružně vázaných dipólových momentů*.



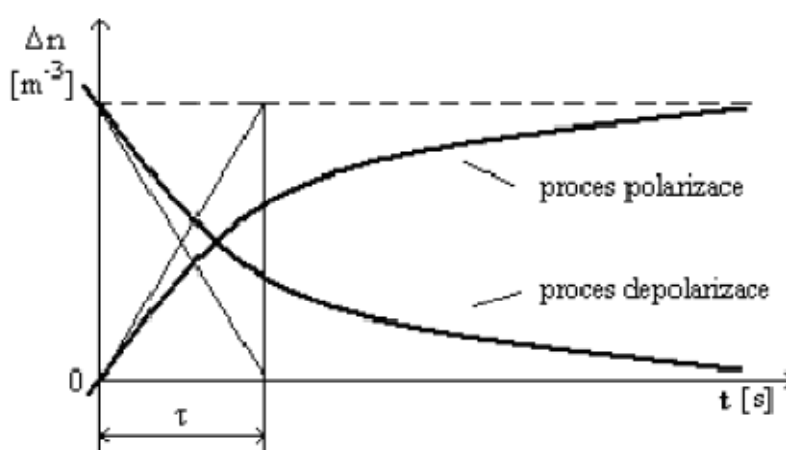
Obr. 2 Druhy polarizačních mechanismů [5]

Relaxační polarizace

Relaxační polarizace se výrazně liší od deformační dobou průběhu, která je značně delší, ale i formou. Ta je pro tuto polarizaci charakteristická relaxačními pochody. *Relaxační polarizace* se může rozdělit na *iontovou* a *dipólovou*. Na mechanismu se podílejí slabě vázané částice, například molekuly plyných a kapalných dielektrik, ionty jsou v dotyčných molekulách vázány silně. Na rozdíl od výše popsané deformační polarizace hraje v případě

relaxační polarizace rozhodující roli teplota - tepelný pohyb nosičů elektrického náboje. Díky tepelnému pohybu mohou slabě vázané částice překonávat poměrně snadno potenciálové bariéry mezi jednotlivými možnými polohami. Bez přítomnosti elektrického pole k polarizaci nedochází. Tepelný pohyb nosičů je totiž chaotický a všechny možné polohy nosičů jsou tedy stejně pravděpodobné a nedochází k jejich nerovnoměrnému rozložení. Přiložením elektrického pole změním poměry neboli výšky potenciálových bariér do té míry, že určité polohy nosičů náboje se stanou energeticky výhodnějšími (pravděpodobnějšími). Tím se stane rozložení nosičů náboje v objemu nerovnoměrné, vznikne asymetrie a jednotka objemu dielektrika získá dipólový moment. Dojde k relaxační polarizaci.

Přechod od nezpolarizovaného dielektrika k dielektriku zpolarizovanému nenastane okamžitě s přiložením elektrického pole. Celý proces polarizace je časově proměnným jevem silně závislejícím na vnějších podmínkách. Popisovaný průběh se dá vyjádřit exponenciální funkcí a je vidět na obr. 3. K ustálenému stavu polarizace se tedy látka (její nosiče elektrického náboje) blíží asymptoticky. Časová konstanta tohoto přechodového jevu se nazývá relaxační dobou a je velice důležitou charakteristickou hodnotou pro polarizaci. Nosiče elektrického náboje potřebují k zaujetí nové (energeticky výhodnější) polohy určitý čas. Stejně tak zánik polarizace je přechodným jevem. Po skončení působení elektrického pole se nosiče vrací do svých výchozích poloh vlivem jejich tepelného pohybu. Ve srovnání s deformační polarizací je čas ustálení u relaxační polarizace mnohem delší i vzdálenosti, o které se nosiče náboje posunou, jsou větší. Zásadní rozdíl je rovněž v tom, že relaxační polarizace je na rozdíl od deformačních ztrátová [5].



Obr. 3 Časový průběh relaxační polarizace [5]

Migrační polarizace

V dielektriku se mohou polarizačních jevů účastnit kromě vázaných nosičů náboje také volné nosiče elektrického náboje. Jedná se pak o *polarizaci migrační*, případně o *polarizaci vznikající prostorovým nábojem*. Nutnou podmínkou pro vznik zmíněného prostorového náboje je kromě přítomnosti volných nosičů náboje i existence makroskopických nehomogenit v daném dielektriku. Právě na nich se po přiložení elektrického pole zachycují migrující volné nosiče náboje a vytváří tak po přeskupení jinou prostorovou hustotu elektrického náboje. Ta se pak navenek projeví jako polarizace dielektrika. Nehomogenitou v dielektriku rozumíme nečistotu, bublinku, vakuolu, prasklinu a podobné strukturální defekty.

Jedná se tedy o oblast s jinými vlastnostmi, než má základní dielektrikum, zejména jiná relativní permitivita a konduktivita. Patří sem i rozhraní ve složených dielektrikách izolačních systémů. Nosiče elektrického náboje se snadno na těchto nehomogenitách zachytávají, neboť každá z nich vytváří rozhraní dvou prostředí, v nichž mají nosiče rozdílnou pohyblivost. Ve srovnání s předešlými polarizacemi je migrační polarizace nejpomalejší. Stejně jako polarizace relaxační jsou spojeny se ztrátou energie.

Význam prostorového náboje na chování dielektrik namáhaných elektrickým polem je velmi velký. Převyšuje svým vlivem všechny ostatní polarizační mechanismy. Vliv prostorového náboje klesá s rostoucí frekvencí, neboť je překrýván účinky ostatních polarizací [5].

1.2 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

1.2.1 Komplexní permitivita

Působením střídavého elektrického pole na dielektrikum, jehož intenzita $\vec{E}_{(t)}$ se mění v závislosti na čase podle vztahu

$$\vec{E}_{(t)} = \vec{E} \cos \omega t \quad (5)$$

kde \vec{E} je amplituda, t čas a $\omega = 2\pi f$ úhlový kmitočet.

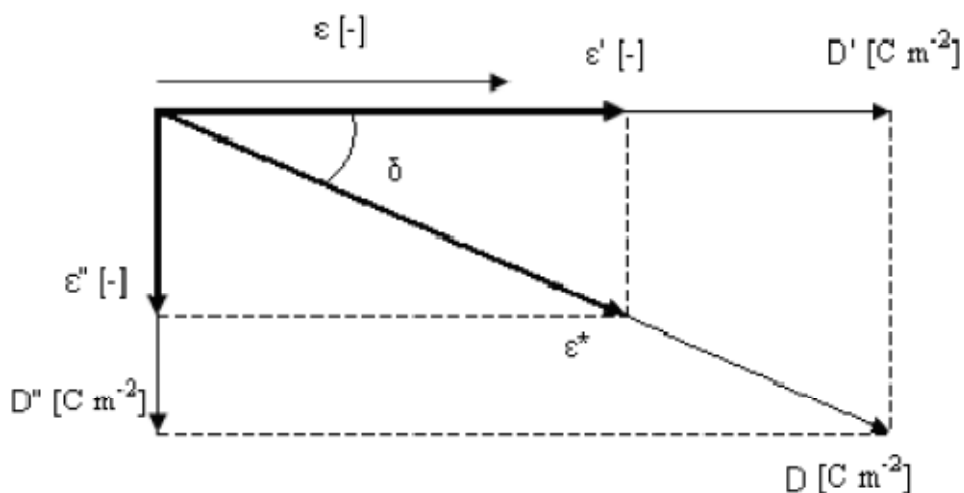
Činitelem závislosti mezi \vec{E} a \vec{D} je veličina nazývaná *komplexní permitivita*, kterou lze vyjádřit vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (6)$$

Reálná složka komplexní permitivity je *vlastní relativní permitivita*, která je mírou kapacitního charakteru dielektrika. Ve střídavém poli má stejný význam jako ε_s v poli statickém. *Imaginární část* – nazývána rovněž *ztrátové číslo*, je *mírou ztrát vzniklých v dielektriku namáhaném střídavým elektrickým polem*.

Komplexní permitivita je funkcí frekvence elektrického pole a popisuje chování technického dielektrika ve střídavém elektrickém poli. Časové zpoždění vektoru elektrické indukce \vec{D} za vektorem elektrického pole \vec{E} je dáno vztahem

$$\vec{D}_{(t)} = \vec{D} \cos(\omega t - \delta) \quad (7)$$



Obr. 4 Vektorový diagram elektrické indukce D a komplexní permitivity ε^* [5]

Z vektorového diagramu na obr. 4 vyplývá pro ztrátové číslo vztah

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \quad (8)$$

kde δ je míra nedokonalosti dielektrického materiálu a nazývá se ztrátovým úhlem. Ztrátový činitel se pak označuje jako $\operatorname{tg} \delta$ a je dán tangencí ztrátového úhlu.

U *nepolárních dielektrik* nemá komplexní relativní permitivita imaginární část a přestává tak být „komplexní“. Její reálná část navíc není frekvenčně závislá.

U *polárních dielektrik* nastává situace, že polarizační děje nemohou sledovat rychlé změny elektrického pole okamžitě, ale s určitým zpožděním – během určité – konečně krátké doby. Mluvíme potom o tzv. *dielektrické relaxaci*. Paul Debye odvodil pro komplexní permitivitu tzv. Debyeovu rovnici

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + j \omega \tau} \quad (9)$$

kde τ je tzv. relaxační doba, závislá na teplotě a nezávislá na čase.

Po rozložení vztahu (9) na reálnou a imaginární část obdržíme pro ε' a ε'' tyto vztahy

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (10)$$

a

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (11)$$

Reálná složka ε' je relativní permitivita jako míra kapacitního charakteru dielektrika, přičemž platí

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon' = \varepsilon_S \quad (12)$$

a

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon' = \varepsilon_\infty \quad (13)$$

kde ε_S je statická relativní permitivita, ε_∞ je optická relativní permitivita.

Imaginární složka ε'' je úměrná polarizačním ztrátám v dielektriku ve střídavém elektrickém poli a nazývá se ztrátovým číslem a platí

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'' = 0 \quad (14)$$

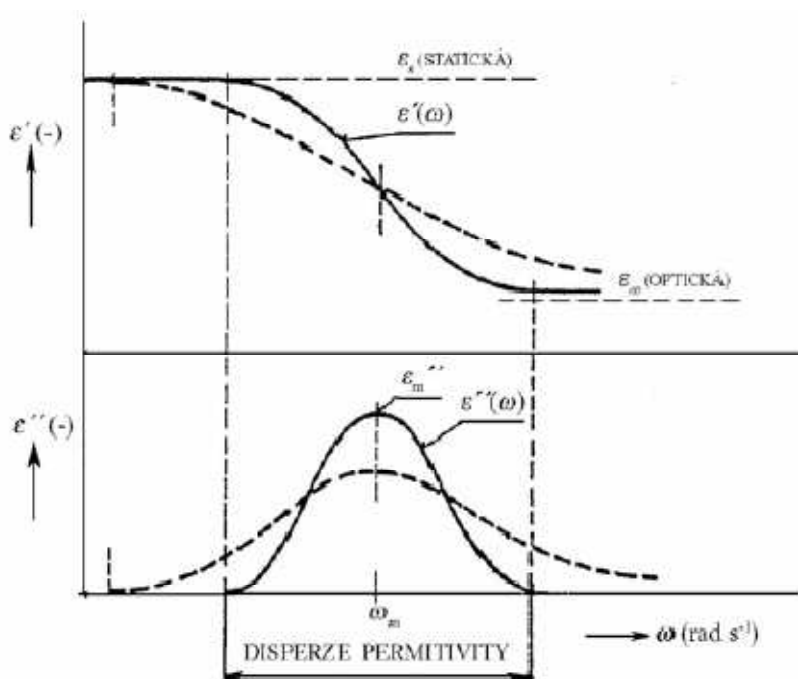
a

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon'' = 0 \quad (15)$$

Ze vztahů (10) a (11) lze získat výraz pro ztrátový činitel, který respektuje pouze polarizační ztráty

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{\varepsilon_S + \varepsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \quad (16)$$

Vynesáním grafických závislostí $\varepsilon' = f(\omega)$ a $\varepsilon'' = f(\omega)$ z výše uvedených rovnic, získáme průběhy (plnou čarou) uvedené na obr. 5



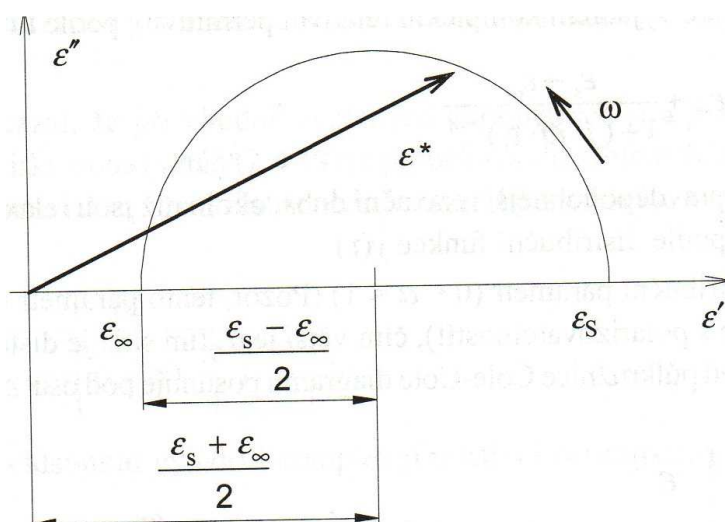
Obr. 5 Závislost složek ε' a ε'' komplexní permitivity na kruhovém kmitočtu ($T = \text{konst.}$) [2]

Permitivita ε' s rostoucí frekvencí plynule klesá z největší hodnoty ε_s na nejmenší hodnotu ε_∞ . Závislost $\varepsilon'' = f(\omega)$ prochází maximem při frekvenci odpovídající inflexnímu bodu závislosti $\varepsilon' = f(\omega)$. Dielektrické polarizační ztráty se ztrácejí při limitních frekvencích $\omega \rightarrow 0$ a $\omega \rightarrow \infty$, kdy se kondenzátor s technickým dielektrikem chová jako ideální kondenzátor. Oblast, kde relativní permitivita ε' klesá s frekvencí, se nazývá oblastí dielektrické disperze.

Eliminací výrazu $\omega \tau$ v rovnicích (10) a (11) pro vzájemný vztah reálné a imaginární závislosti komplexní permitivity lze získat rovnici kružnice ve tvaru

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_S + \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (17)$$

Grafickému znázornění rovnice (17) se říká „*Cole-Cole kruhový diagram*“. Jeho základní tvar je zobrazen na obr. 6. Je sestaven na základě dříve uvedených předpokladů jednoho polarizačního mechanismu s jednou jedinou relaxační dobou. Reálná dielektrika se však ve skutečnosti skládají z více vzájemně se lišících skupin polárních molekul, jejichž relaxační doby mohou být odlišné. Průběh komplexní relativní permitivity je pak dán superpozicí jednotlivých Debyeových mechanismů s různými relaxačními dobami.



Obr. 6 Cole-Cole kruhový diagram pro dielektrikum s jednou relaxační dobou [5]

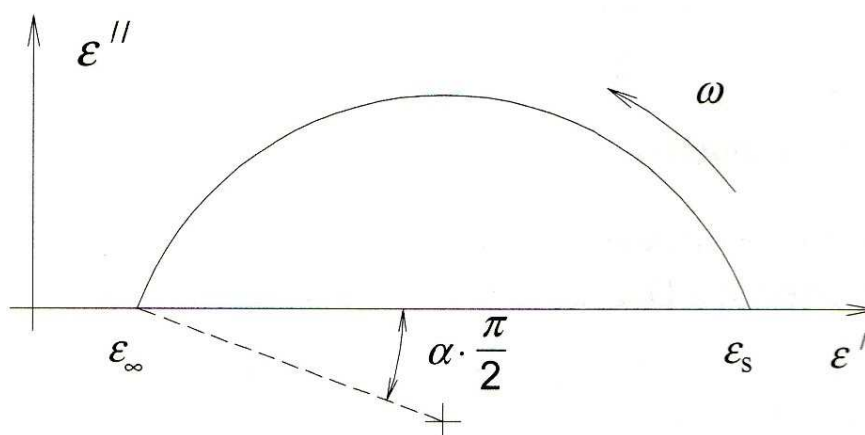
Zploštění obou křivek se vysvětluje tím, že Debyeův průběh $\varepsilon^* = f(\omega)$ podle vztahu (9) platí jen tehdy, jestliže se všechny dipólové molekuly chovají stejně a přitom na sebe vzájemně nepůsobí a existuje tak jen jeden typ relaxačního mechanismu s jednou relaxační dobou τ . U složitějších látek, které obsahují současně několik typů dipólových molekul, bude mít každý typ molekul svou vlastní relaxační dobu.

Zploštělým křivkám odpovídá upravený Debyeův vztah ve tvaru

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + (j \omega \tau_1)^{1-\alpha}} \quad (18)$$

kde τ_1 je nejpravděpodobnější relaxační doba, okolo níž jsou relaxační doby rozděleny podle distribuční funkce $y(\tau)$; α je distribuční parametr ($0 < \alpha < 1$), který je kmitočtově nezávislý a určuje šířku distribuce relaxačních dob.

Čím větší je α , tím širší je distribuce a tím více se střed půlkružnice Coleho-Coleho diagramu posunuje pod osu ϵ' (viz. obr. 7). Pro $\alpha = 0$ přejde vztah (18) do tvaru (9) klasického Debyeho průběhu.



Obr. 7 Cole-Cole diagram s jedním distribučním parametrem [5]

1.2.2 Dielektrické ztráty v pevných izolantech

S pojmem dielektrické ztráty jsme se již setkali ve spojení s komplexní permitivitou. Nyní se budeme věnovat tomuto fenoménu blíže, neboť se jedná o velmi důležitou a z hlediska aplikovatelnosti izolantů jejich klíčovou vlastnost.

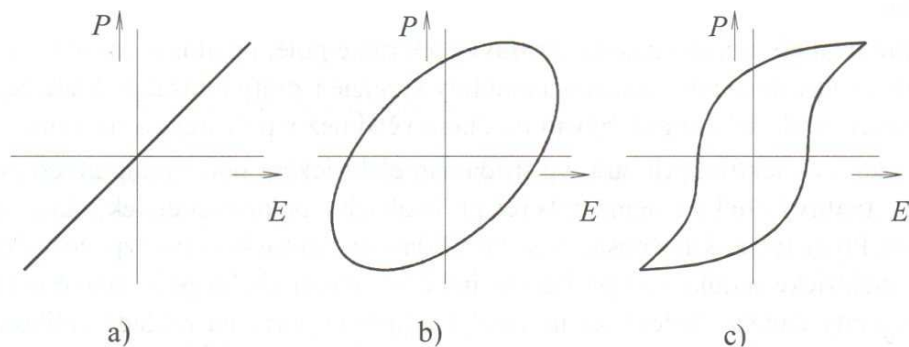
Obecně lze říci, že pro použití izolantů je rozhodující, kolik elektrické energie se díky dějům odehrávajícím se v jeho struktuře po jeho zatížení elektrickým polem změní v jeho objemu za jednotku času v jinou, většinou, z hlediska elektroizolační techniky nežádoucí, tepelnou energii. Tuto změnu energie nazýváme *dielektrickými ztrátami*. Jedná se o jev, jehož vlivem, jak je patrné z výše uvedeného, se izolant zahřívá. Existují případy, kdy se tohoto jevu využívá (dielektrický ohřev), to ovšem je zcela mimo problematiku elektroizolační techniky. Při provozu elektrického zařízení je nutné zajistit, aby takto vzniklé teplo bylo odvedeno do okolí a nedocházelo k lokálnímu přehřátí dielektrika. To totiž následně okamžitě

vede k dalšímu nárůstu ztrát a tím opětovnému následnému nárůstu teploty. Tento nežádoucí proces může posléze končit tepelným průrazem, destrukcí izolantu.

Mechanismus vzniku dielektrických ztrát záleží na mnoha faktorech a v jednotlivých izolantech se liší v závislosti na jejich druhu, struktuře a vlastnostech. Závisí pochopitelně taky na chemickém složení, obsahu nečistot a příměsí, na vnitřní stavbě a skupenství a na vnějších fyzikálních podmínkách. *Příčinou dielektrických ztrát* jsou pochopitelně pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje obsažených v materiálu. Se ztrátou energie jsou tedy spojeny elektrická vodivost izolantů a některé druhy polarizací. Kromě těchto dějů ve struktuře mohou dielektrické ztráty vznikat i vlivem výbojové činnosti (částečných výbojů) v nehomogenitách dielektrika. Jedná se o elektrické výboje přemostřující pouze určitou část vzdálenosti mezi elektrodami a mající degradační účinky na prostředí, v němž vznikají. Pak mluvíme o ionizačních ztrátách. Dielektrické ztráty zahrnují tedy *vodivostní ztráty* vznikající vlivem vodivostního proudu procházejícího dielektrikem i vlivem proudu tekoucího po jeho povrchu. Ty se vyskytují ve všech izolantech a jejich uplatnění závisí na velikosti konduktivity daného dielektrika. Dále *ztráty vznikající relaxačními polarizacemi* (tzn. iontovou nebo dipólovou relaxační polarizací) tím, že vnější elektrické pole částečně překonává a usměrňuje chaotický tepelný pohyb částic, čímž jej narušuje. To je příčinou opoždování pohybů vázaných nosičů elektrického náboje za změnami vnějšího elektrického pole. Část energie získané na úkor elektrického pole se při těchto dějích mění v teplo – vznikají zmíněné relaxační ztráty – závisející na teplotě dielektrika a frekvenci působícího elektrického pole.

Dalším polarizačním dějem, který je provázený ztrátou energie je *migrační* (mezivrstvá) polarizace. Zde dochází ke tvorbě prostorového náboje. Ten mění svoje rozmístění se změnami působícího elektrického pole. Jak pohyb volných nebo velmi slabě vázaných nosičů elektrického náboje v elektrickém poli, který tuto polarizaci provází, tak pohyby prostorového náboje při této polarizaci jsou provázeny ztrátou energie. I tyto ztráty jsou silně závislé na teplotě a frekvenci.

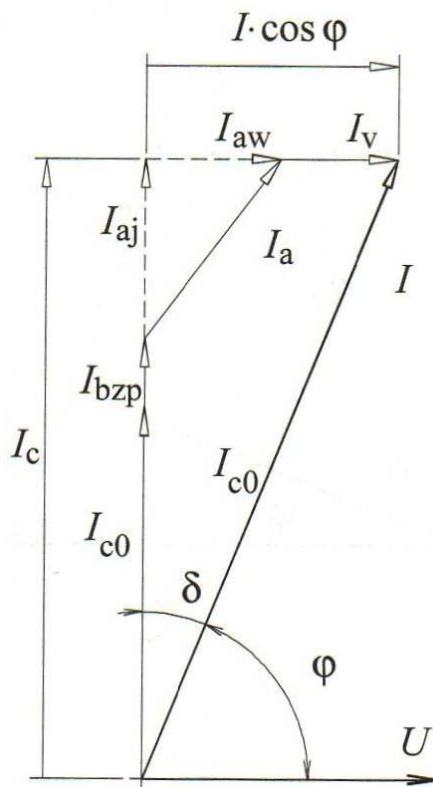
Vyneseme-li závislost velikosti vektoru polarizace na intenzitě působícího střídavého elektrického pole v průběhu jedné periody (obr. 8), získáme dobrý přehled o tom, jak jednotlivé polarizace přispívají k celkovým dielektrickým ztrátám. Jestliže se v materiálu vyskytují pouze pružné polarizace, polarizační ztráty nevznikají a závislost $P = f(E)$ je lineární (obr. 8a). Jestliže se v dielektriku vyskytují kromě pružných i polarizace relaxační, dochází ke ztrátám energie a závislost $P = f(E)$ má tvar elipsy. Její obsah je úměrný velikosti ztracené energie (přeměněné v teplo) za jednu periodu (obr. 8b). Obr. 8c platí pro ferroelektrické látky – závislost $P = f(E)$ má tvar hysterezní smyčky [5].



Obr. 8 Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole [5]

Pro vznik dielektrických ztrát platí, že existují při stejnosměrném i střídavém napětí, a to při jakémkoliv tvaru napěťové křivky. Pokud na dielektriku působí střídavé elektrické pole, uplatní se kromě vodivostních i ztráty vyvolané polarizacemi a mnohdy výrazně i ztráty ionizační. Platí, že ztráty ve střídavém elektrickém poli bývají mnohem větší než v poli stejnosměrném. V praxi ztráty daného dielektrika nejčastěji vyjadřuje právě na základě velikosti tangenty ztrátového úhlu δ a mluvíme pak o *ztrátovém činiteli* – $\operatorname{tg} \delta$. Dielektrické ztráty můžeme vyjádřit pomocí *ztrátového výkonu* P_Z , případně pomocí *měrných dielektrických ztrát* p_Z , tzn. ztrátového výkonu vztaheného na jednotku objemu.

Při vyjádření dielektrických ztrát ve střídavém elektrickém poli předpokládáme, že na dielektrikum působí sinusové napětí a že nevznikají žádné jiné rušivé procesy např. částečné výboje. Pochody v dielektriku lze pak pokládat za lineární a relativní permitivitu za konstantní. Vzniklé jevy jsou pak téhož kmitočtu jako přiložené napětí a proud přitékající do dielektrika je rovněž sinusový. Tento proud lze rozložit do složek – viz fázový diagram na obr. 9. Proudem I_{C0} se nabíjí geometrická kapacita daného uspořádání C_0 . Proud I_{bzp} odpovídá rychlým bezeztrátovým polarizacím (elektronové a iontové). Absorpční proud I_a odpovídá ztrátovým pomalým polarizacím. Můžeme ho rozložit na dvě kolmé složky – jalovou (bezeztrátovou) složku I_{aj} , která odpovídá kapacitě C_p , o níž se zvětšila geometrická kapacita C_0 následkem absorpčních jevů a činnou (ztrátovou) složkou I_{aw} . Vodivostní proud I_v způsobený nenulovou elektrickou vodivostí technického dielektrika je ve fázi s přiloženým napětím. Z fázového diagramu je patrné, že v ideálním bezeztrátovém dielektriku by fázor proudu předbíhal fázor napětí o fázový úhel $\varphi = 90^\circ$. V technickém (reálném) dielektriku je však tento fázový posun zmenšen o ztrátový úhel δ [5].



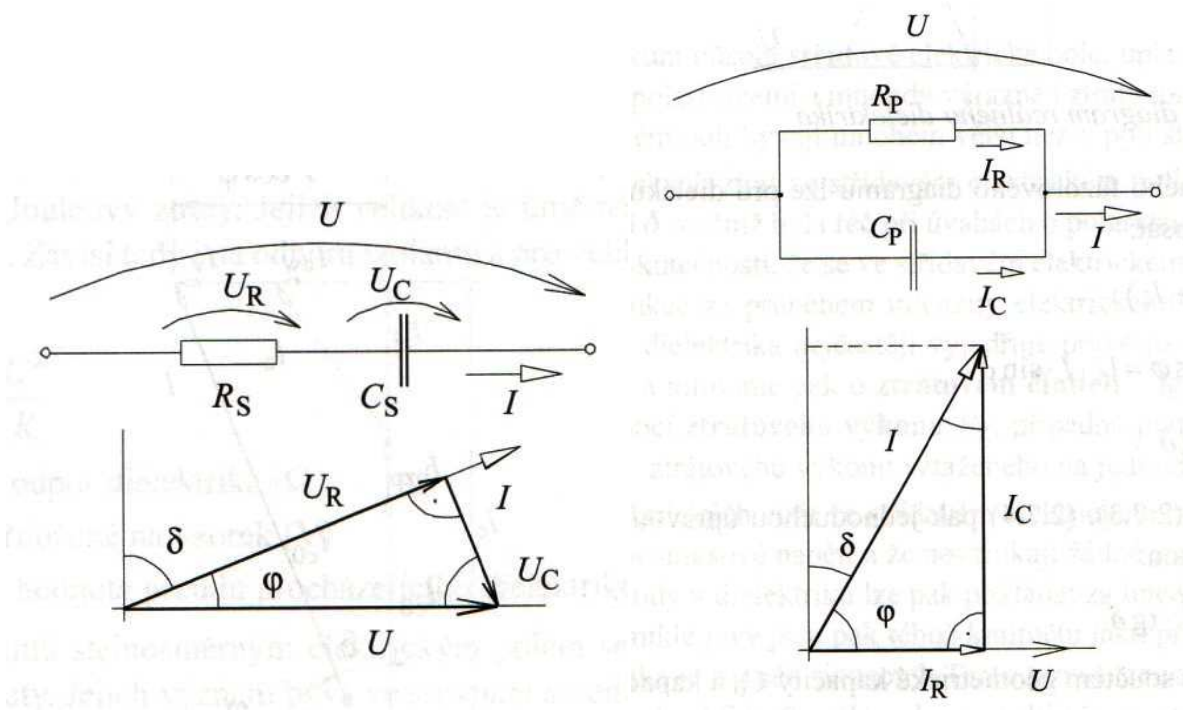
Obr. 9 Fázorový diagram reálného dielektrika [5]

Poté jednoduchou úpravou dostáváme výsledný vztah pro *ztracený výkon*:

$$P_{zstř} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (19)$$

kde C je kapacita daná součtem geometrické kapacity C_0 a kapacity C_p .

Pro popis chování technického dielektrika ve střídavém elektrickém poli z hlediska dielektrických ztrát se za předpokladu lineárních pochodů v dielektriku používají tzv. ekvivalentní *náhradní obvody*. V žádném případě však nevysvětlují fyzikální podstatu dielektrických ztrát, pouze „simulují“ chování kondenzátoru s technickým dielektrikem vzhledem k vnějším obvodům. Obr. 10 zachycuje sériový a paralelní náhradní obvod s odpovídajícími fázovými diagramy [5].



Obr. 10 Sériový a paralelní náhradní obvod [5]

Sériové zapojení:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S \quad (20)$$

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

Paralelní zapojení:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P} \quad (22)$$

$$P_Z = \omega \cdot C_P \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (23)$$

Pro prvky sériového a paralelního náhradního schématu potom lze psát:

$$C_P = \frac{C_S}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad a \quad R_P = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta} \cdot R_S \quad (24)$$

V případě běžně používaných kvalitních dielektrik bývá úhel δ velmi malý, ve výše uvedených rovnicích lze proto výraz $\operatorname{tg}^2 \delta$ zanedbat proti jedničce a následně potom psát:

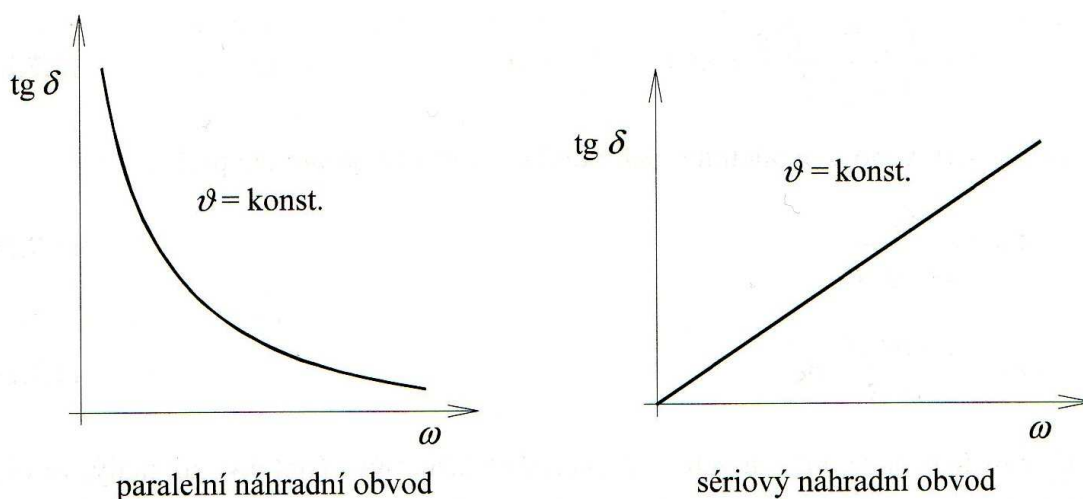
$$C_P = C_S = C \quad (25)$$

$$R_P \gg R_S \quad (26)$$

$$P_Z = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (27)$$

Pro malé hodnoty $\operatorname{tg} \delta$ (nejčastější případ) se obě náhradní schéma liší jen nepatrně. S ohledem na to, že $R_P \gg R_S$, se však kapacita kondenzátoru určuje z paralelního náhradního schématu. Rozdíly mezi oběma schématy se výrazně projeví u dielektrik s velkými dielektrickými ztrátami. Hodnota zjišťované kapacity pak závisí na volbě náhradního schématu a zůstává tedy věcí dohody, které z obou se volí. Důležité je to především s hlediska měření permitivity [5].

Ztrátový činitel v *paralelním náhradním obvodu* klesá s rostoucí frekvencí (při konstantní teplotě) podle hyperboly. V případě *sériového náhradního obvodu* tedy při stálé teplotě ztrátový činitel roste lineárně se vzrůstající frekvencí – viz obr. 11.

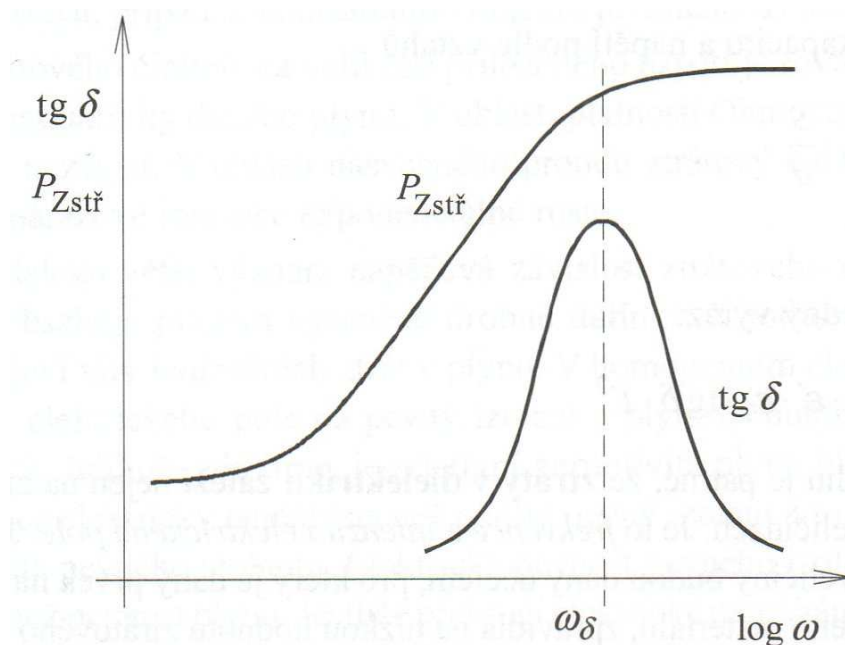


Obr. 11 Závislost $\operatorname{tg} \delta$ v náhradních obvodech na frekvenci [5]

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ se v praxi používá pro rychlé posouzení kvality daného izolantu. Dobrý je materiál, jehož $\operatorname{tg} \delta$ je menší než 10^{-3} , z elektroizolačního hlediska špatný s $\operatorname{tg} \delta$ větším než 10^{-2} . Uvedené hledisko posuzování izolantů je operativní a rychlé, ale

pochopitelně velmi zjednodušené. Objektivnější a lepší názor na vlastnosti daného materiálu poskytují závislosti ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ na napětí, frekvenci a teplotě. Jedná se o následující charakteristiky:

- **ztrátová charakteristika** – $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ – závislost ztrátového činitele na střídavém napětí při určité dané frekvenci a teplotě. Probíhá buď vodorovně, nebo má mírně stoupající charakter. Pokud se při určitém napětí ohýbá k vyšším hodnotám, jsou příčinou tohoto nárůstu částečné výboje vznikající v nehomogenitách materiálu nad určitou úrovní napětí.
- **frekvenční charakteristika** – $\operatorname{tg} \delta = f(f)$ – závislost ztrátového činitele na frekvenci při daném určitém napětí a teplotě. Na obr. 12 je uvedena závislost ztrátového výkonu $P_{Zstř}$ a $\operatorname{tg} \delta$ na frekvenci. Ztrátový výkon s frekvencí vzrůstá tak dlouho, dokud dipólové molekuly stačí sledovat změny působícího elektrického pole. Od určité frekvence už dipólové molekuly změny elektrického pole sledovat nestačí a velikost ztrátového výkonu se postupně ustálí. Oblast ustálení ztrátového výkonu odpovídá oblasti poklesu ztrátového činitele. Na těchto charakteristikách lze při určitých frekvencích nalézt lokální extrém. Oblastem těchto frekvencí se při aplikaci daného izolantu vyhýbáme.



Obr. 12 Frekvenční závislost $\operatorname{tg} \delta$ a P_z [5]

- 1) **teplotní charakteristika** – $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ – závislost ztrátového činitele na teplotě při dané určité frekvenci a určitém napětí. I na těchto charakteristikách lze pro určité teploty nalézt lokální extrémy. Odpovídající možnosti sledování pohybu elementárních dipólů v závislosti na teplotě – tepelný pohyb podporuje nebo je proti pohybu vyvolávanému elektrickým polem.

K posouzení izolantů z hlediska dielektrických ztrát lze použít kromě ztrátového činitele a ztrátového výkonu i tzv. *měrné dielektrické ztráty* – celkové ztráty vztažené na jednotku objemu [5].

1.3 Využití a vlastnosti elektroizolačních materiálů

1.3.1 Faktory ovlivňující dielektrické vlastnosti

V následujícím textu je popsán vliv kmitočtu, intenzity elektrického pole, teploty a vlhkosti na dielektrické vlastnosti.

Kmitočet

Protože pouze několik látek, např. tavený křemen, *polystyren* nebo polyetylen má ϵ_r a $\operatorname{tg} \delta$ prakticky konstantní v celém pásmu kmitočtů využívaném v elektrotechnice, je třeba měřit permitivitu a ztrátový činitel při kmitočtech, při kterých bude daný materiál využíván.

Změny permitivity a ztrátového činitele vznikají vlivem polarizace a konduktivity dielektrika. Nejvýznamnější změny působí dipólová polarizace polárními molekulami a mezivrstvou polarizace působená nehomogenitami materiálu.

Teplota

Ztrátové číslo může dosáhnout maxima při určitém kmitočtu, který závisí na teplotě dielektrika. Teplotní součinitelé ztrátového činitele a permitivity mohou být kladné nebo záporné v závislosti na poloze maxima ztrátového čísla vzhledem k teplotě měření.

Vlhkost materiálu

Stupeň polarizace se zvyšuje sorpcí vody nebo tvorbou vodního filmu na povrchu dielektrika, z toho plyne i růst permitivity, ztrátového činitele a konduktivity s vlhkostí při stejnosměrném proudu. Kondicionování zkušebních vzorků má tedy rozhodující význam

a udržování vlhkosti vzorku i prostředí před zkoušením i po něm je bezpodmínečně nutné, mají – li být výsledky správně interpretovány.

Intenzita elektrického pole

Pokud dochází k mezivrstvosvé polarizaci, koncentrace volných iontů roste s intenzitou elektrického pole, velikost a poloha maxima ztrátového čísla se přitom mění. Při vyšších kmitočtech permitivita a ztrátový činitel nezávisí na intenzitě elektrického pole, pokud uvnitř dielektrika nedochází k parciálním výbojům [3].

2 Experimentální část

2.1 Zkušební vzorky

Charakteristika produktu

QUINN PS je obchodní značka vytlačovaných desek z krystalického polystyrenu společnosti Quinn Plastics. Polystyren je jedním z našich nejzákladnějších a nejužitečnějších materiálů. Ačkoliv není tak technicky vyspělý jako jiné materiály, polystyren plní roli, se kterou mají ostatní deskové výrobky problémy – dobrý vzhled za nízkou cenu. Díky procesu vytlačování lze desky QUINN PS objednat v čírem, antireflexním, opálovém i barevném provedení. Vyznačují se dobrými optickými vlastnostmi a zářivým povrchem. Navíc mají desky QUINN PS vysokou světelnou propustnost (min. 88% vlnové délky: 500 nm při tloušťce 3 mm). Mezi další důležité vlastnosti desek QUINN PS patří nízká cena, nízká hustota (1,05), vysoká odolnost vůči chemikáliím a vynikající tuhost. Jsou standardně odolné vůči ultrafialovému záření a při využití v interiéru zůstává jejich barva beze změny po několik let [4].

Desky QUINN PS v sobě spojují tyto vynikající vlastnosti:

- ✓ skvělá propustnost světla, dostatečná tvrdost povrchu
- ✓ snadná recyklace, nízká nasákavost vodou

Použití:

- ✓ zasklívání obrazů a interiérů
- ✓ ploché nebo zaoblené dveře sprchových koutů

S deskami QUINN PS se snadno manipuluje. Lze je snadno řezat, ohýbat, vrtat apod. Podrobnější informace vám poskytne technické oddělení společnosti Quinn Plastics. Bez problémů je lze dále opracovávat (včetně frézování, vrtání, řezání, leštění, broušení, hoblování, tvarování za tepla apod.). Desky QUINN PS jsou k dispozici ploché, vzorované a prizmatické. Sortiment vzorů je rozsáhlý a může podléhat speciálním podmínkám. *Ploché desky* QUINN PS jsou z obou stran laminované polyetylenovou fólií. Barvy: *Clear* (s antireflexní vrstvou nebo bez ní) a *Opal Standard* s rozsahem tloušťky od 0,9 do 6 mm (standardní tloušťka 1 – 4,75 mm). Tloušťka 5 a 6 mm je k dispozici za speciálních podmínek. Speciální tloušťky, barvy a vzory lze vyrobit na zvláštní objednávku, která může podléhat zvláštním podmínkám [4].

Polystyren (PS)

V základním uhlíkatém řetězci navázána chemická skupina C_6H_5 -. Připravuje se blokovou, emulzní, suspenzí nebo roztokovou polymerací za pomoci peroxidů jako iniciátorů. Vykazuje prakticky nulovou nasákavost. Umožňuje velmi dokonalé tváření vstřikováním. Výlisky jsou průhledné jako sklo a mají hladký povrch [1].

Vlastnosti:

- ✓ $\epsilon_r = 2,6$
- ✓ $\epsilon_r = 1,00054$ (pro vzduch)
- ✓ $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-3}$

Tab. 2 Přehled technických údajů [4]

■ OBECNÉ VLASTNOSTI			
Vlastnost	Metoda	Jednotky	QUINN PS
Hustota	ISO 1183	g/cm ³	1,05
Tvrdost podle Rockwella	ISO 2039-1	Stupnice M	150
■ OPTICKÉ VLASTNOSTI			
Vlastnost	Metoda	Jednotky	QUINN PS
Světelná propustnost	DIN 5036-3	%	89
Index lomu	ISO 489	n _{D20}	1,59
■ MECHANICKÉ VLASTNOSTI			
Vlastnost	Metoda	Jednotky	QUINN PS
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	MPa	3450
Mez pružnosti v ohybu	ISO 178	MPa	85
Modul pevnosti v tahu	ISO 527-2	MPa	3400
Mez pevnost v tahu	ISO 527-2	MPa	45
Poměrné prodloužení při přetržení	ISO 527-2	%	3
■ TEPELNÉ VLASTNOSTI			
Vlastnost	Metoda	Jednotky	QUINN PS
Teplota podle Vicatc (VST/B 50)	ISO 306	°C	101
Teplota průhybu při zatížení (A)	ISO 75-2	°C	86
Specifická tepelná kapacita	ASTM D-2766	J/gK	1,8
Lineární teplotní roztažnost	DIN 53752	K ⁻¹ ×10 ⁻⁵	8
Tepelná vodivost	DIN 52612	W/mK	0,16
Degradační teplota		°C	> 280
Maximální provozní teplota		°C	80
Rozsah teplot při tvarování		°C	130-170
■ ODOLNOST VŮČI NÁRAZU			
Vlastnost	Metoda	Jednotky	QUINN PS
Charpyho zkouška vrubové houževnatosti	ISO 179-1	kJ/m ²	-
Charpyho zkouška rázové houževnatosti	ISO 179-1	kJ/m ²	6
■ ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI			
Vlastnost	Metoda	Jednotky	QUINN PS
Měrný odpor objemový	DIN 53482	Ω.cm	> 10 ¹⁴
Měrný odpor na povrchu	DIN 53482	Ω	> 10 ¹⁴

Tab. 3 Odolnost vůči chemikáliím při 20°C [4]

Aceton	-	Glykoly	+
Kyseliny (slabý roztok)	+	Glycerin	+
Alkoholy		Hexan	+
Etyl	+	Metylchlorid	-
Izopropyl	+	Metyletylketon	-
Metyl	+	Ropa	+
Čpavek (slabý roztok)	+	Petrolej	+
Benzen	-	Toluen	-
Chlorid uhličitý	-	Chlorid sodný (roztok)	+
Chloroform	-	Hydroxid sodný (roztok)	+
Etyl acetát	-		

- neodolný
+ odolný

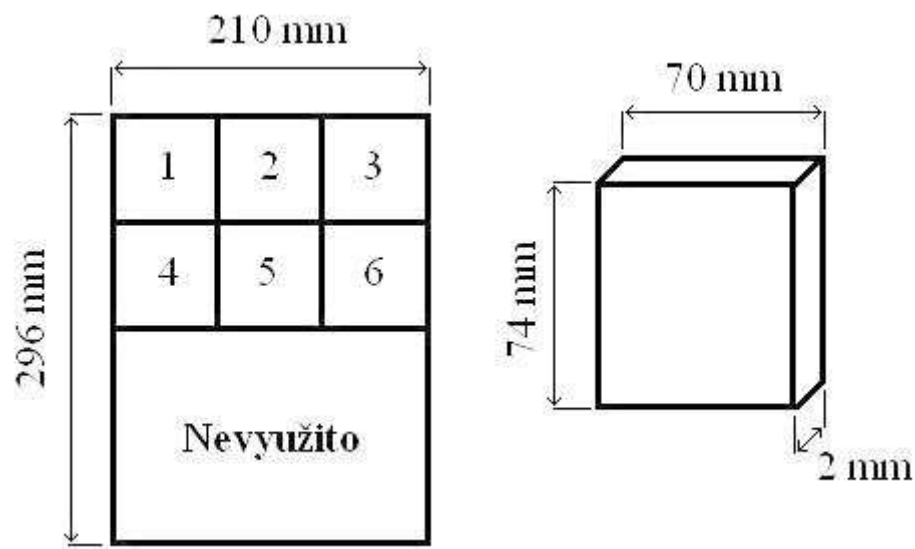
Příprava zkušebních vzorků

Experimentální vzorky Quinn PS tloušťky 2 mm, 3 mm a 6 mm byly dodány ve formě desek o velikosti (šířka = 210 mm, výška = 296 mm).

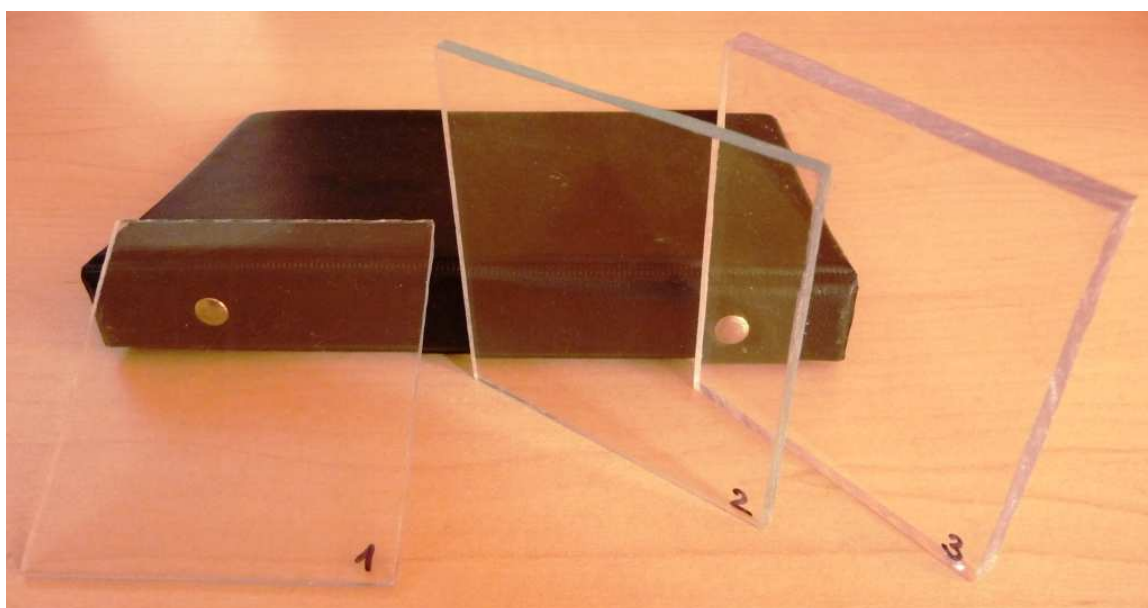
Pro zkušební experiment jsme využili pouze polovinu desky vzorku. Bylo vyrobeno „šest“ vzorků od rozměru cca 74 x 70 mm, tzn. „osmnáct“ vzorků celkem. Rozvržení desky, rozměry a výsledná tvar vzorku jsou zobrazeny na obr. 13. Vzorky byly označeny pořadovým číslem 1 – 6 pro všechny zvolené tloušťky. Výsledný přehled vypočtených aritmetických průměrů tloušťky vzorku je uveden v Tab. 4 a dokumentu Excel na záložce „tloušťka vzorku“, který je přiložen na CD.

Tab. 4 Přehled aritmetických průměrů tloušťky vzorku

Tloušťka [mm]	Aritmetický průměr změřené tloušťky h [mm]
2	1,94
3	2,90
6	5,74



Obr. 13 Rozvržení desky a výsledný tvar vzorku



Obr. 14 Nařazené vzorky

Vzorky byly připraveny v domácím prostředí a nařezány na rozměry s ochrannou laminovanou polyetylenovou fólií „novým“ plátkem na železo, aby nedošlo ke kontaminaci vzorku (u již použitého plátku – železné piliny, kontaminace jiným materiálem apod.). Při řezání jsme dávali hlavně pozor, aby nedošlo k poškrábání vzorku železným plátkem!

Nakonec byla po nařezání z obou stran odstraněna ochranná fólie. Deska tloušťky 2 mm neměla tuto ochrannou fólii z obou stran již při převzetí!

Pro přesné stanovení tloušťky vzorků byl použit mikrometr (obr. 15). Tloušťka byla měřena na jedenácti různých místech každého vzorku. Abychom odstranili hrubé chyby byla z těchto jedenácti měření vynechána *největší a nejmenší* hodnota. Poté ze zbývajících devíti zbylých hodnot byla statisticky vyhodnocena a určena průměrná hodnota tloušťky daných vzorků pomocí vzorce $\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$. Všechny dílčí výsledky se udávají a zaokrouhlují na tři platná místa, konečný výsledek pak na dvě platná místa.



Obr. 15 Mikrometr [10]

Pojem nejistota měření

Účelem stanovení nejistot při měření je zjištění intervalu hodnot okolo výsledku měření, který lze přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření zjištěná při kalibraci je základem pro zjištění nejistot měření ve výrobě, kontrole a zkušebně. Nejistoty měření se do běžné praxe kalibračních laboratoří dostaly poměrně nedávno - přibližně okolo roku 1990.

Na počátku jakéhokoli vyhodnocení nejistot stojí detailní porozumění podstatě prováděného měření, popsaného (nebo popsateľného) modelem měření. To samozřejmě neznamená nutnost detailní znalosti principů, funkcí a konstrukčních detailů každého měřicího přístroje, ale znalost metody měření a schopnost rozhodnout, jaké vlivy mohou působit v průběhu měření jako zdroje nejistoty a ovlivnit výsledek. Mnohdy jsou tyto informace obsaženy v návodu k použití konkrétních přístrojů, nebo v popisu již prověřených metod měření. Model měření tedy musí být schopen popsat nejen vlastní měření, ale též i to, jak se do výsledku promítají ovlivňující vlivy z okolí, které představují jednotlivé zdroje výsledné nejistoty [6].

a) *nejistota typu A*

Stanovena výpočtem z opakovaných měření dané veličiny. Optimální počet měření je „11“. Je uvedeno, že mírou nejistoty typu A je *výběrová směrodatná odchylka* výběrového průměru. Výběrová proto, že naměřené hodnoty představují určitý malý výběr z prakticky nekonečného množství hodnot, kterých by mohla měřená veličina nabývat. Výběrového průměru proto, že hodnota, která se uvádí jako výsledek měření, se získá výpočtem průměrné hodnoty takto opakovaně provedených odečtu, tedy sečtením všech hodnot a vydělením součtu počtem provedených odečtu. Tomuto matematickému názvu též odpovídá příslušný vztah, podle kterého se standardní nejistota typu A vypočte [6]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

b) *nejistota typu B*

Na rozdíl od nejistoty typu A, která byla stanovena z opakovaných měření, pro složky nejistoty typu B platí, že jsou stanoveny jinak než opakovaným měřením. Rozdíl mezi typem A a typem B je tedy jasný, problém však je v tom, jak jinak je tedy nejistota typu B stanovena. Zde je nutné nejprve najít všechny možné zdroje nejistot typu B [6].

1. *Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení*

- ✓ nejistoty kalibrace nebo ověření, stabilita (časová specifikace) přístrojů
- ✓ dynamické chyby přístrojů, zanedbané systematické chyby
- ✓ vnitřní tření v přístrojích, rozlišitelnost/rozlišení odečtu z přístrojů
- ✓ hystereze, mrtvý chod, specifikace výměnných částí přístrojů

2. *Vlivy okolního prostředí a jejich změny*

- ✓ tlak, změna tlaku, relativní vlhkost, magnetické pole
- ✓ elektrické pole, osvětlení, příp. jeho frekvence a tepelné vyzařování
- ✓ hustota vzduchu, čistota prostředí, ovzduší, prašnost ...
- ✓ napájecí napětí, stabilita, frekvence, harmonické zkreslení
- ✓ zemní smyčky

3. *Vlivy metody*

- ✓ ztráty, svodové proudy
- ✓ interakce s měřeným předmětem
- ✓ nejistoty použitých konstant

- ✓ vlivy reálných parametru, oproti ideálním, uvažovaným v modelech
- ✓ vlastní ohřev, odvod či přestup tepla

4. Vlivy operátora

- ✓ nedodržení metodik, paralaxa
- ✓ elektrostatické pole, tepelné vyzařování
- ✓ osobní zvyklosti.

5. Ostatní vlivy

- ✓ náhodné omyly při odečtech nebo zápisu hodnot
- ✓ těžko postihnutebné globální vlivy (vliv Měsíce, vlivy ročních období, vlivy denní doby, vliv polohy ionosféry a podobně)

Určí se nejistoty typu B z jednotlivých zdrojů Z_j ze vztahu:

$$u_{BZ} = \frac{\Delta Z_{max}}{\kappa} \quad (29)$$

kde κ je koeficient rozdělení, pro rovnoměrné rozdělení $\kappa = \sqrt{3}$.

Celková nejistota typu B je dána geometrickým součtem nejistot jednotlivých zdrojů:

$$u_B = \sqrt{u_{BZ}^2} \quad (30)$$

Kombinovaná standardní nejistota výsledku měření je geometrickým součtem nejistoty typu A a nejistoty typu B a stanoví se pomocí následujícího vztahu:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (31)$$

Rozšířená standardní nejistota – standardní kombinovaná nejistota „ u “ byla určena s pravděpodobností $P = 95 \%$, tj. pro koeficient rozšíření $\kappa = 2$ (hodnoty pro praktické měření).

$$U = \kappa \cdot u \quad (32)$$

2.2 Zkušební zařízení

2.2.1 Měřicí zařízení

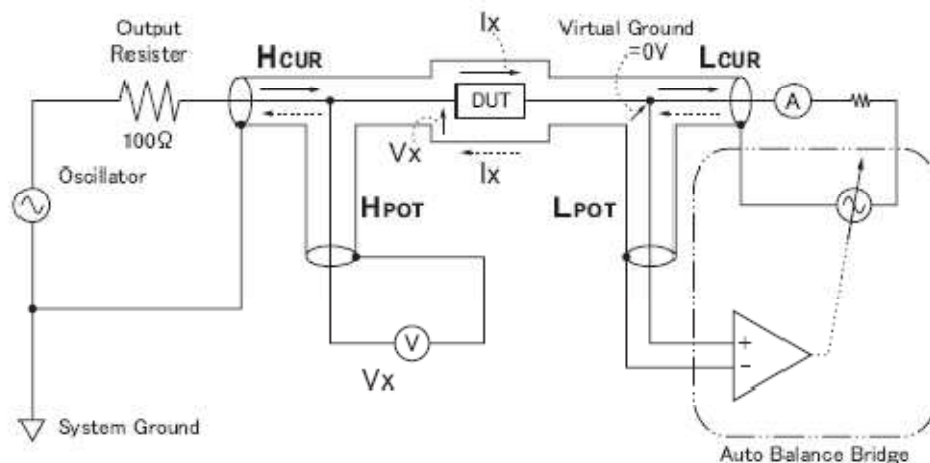
Složky komplexní permitivity byly v kmitočtové závislosti měřeny přesným LCR metrem firmy Agilent E4980A (obr. 16). Zařízení využívá k měření mostovou metodu s automatickým vyvažováním.



Obr. 16 LCR metr Agilent E4980A [7]

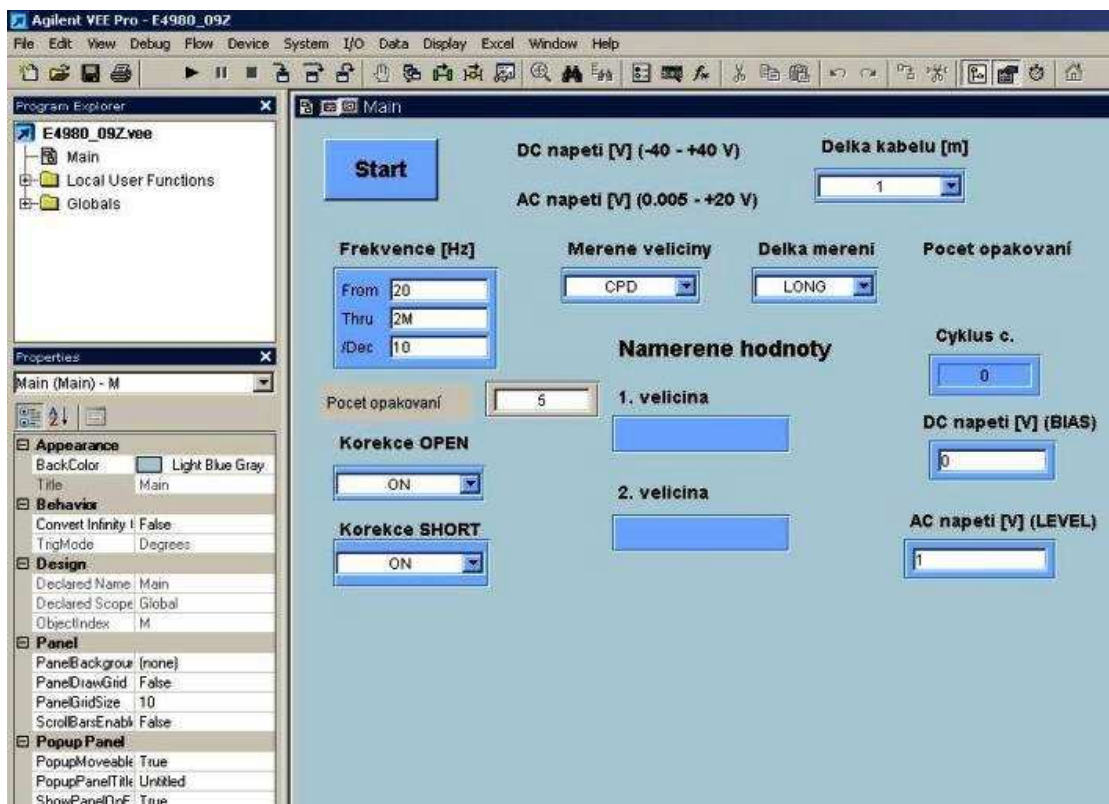
Zapojení je uvedeno na obr. 17, celé měření je zautomatizováno pomocí operačního zesilovače, který řídí oscilátor v pravé větvi zapojení tak, aby byl součet proudů v obou větvích zapojení roven nule. Požadovaný měřicí kmitočet s danou velikostí amplitudy je nastavován na oscilátoru v levé větvi zapojení.

LCR metr poskytuje nejlepší kombinaci přesnosti, rychlosti, a přizpůsobivost pro široký okruh měřících komponentů. Měřicí rozsah se pohybuje od 20 Hz do 2 MHz, což je ideální pro použití v hlavních výzkumných, vývojových a výrobních testech součástí a materiálů. Velikost testovacích signálů v rozsahu proudů je $0 \mu A_{\text{rms}}$ až $20 \text{ mA}_{\text{rms}}$ a v rozsahu napětí $0 \text{ mV}_{\text{rms}}$ až 2 V_{rms} . Díky funkci nastavení 4 druhů délek vodičů (0 m, 1 m, 2 m, 4 m) může přístroj přesněji počítat s chybami. LCR metr se propojuje s PC pomocí rozhraní GPIB, USB nebo LAN sítě. Všechna nastavení a ovládání měřícího procesu jsou plně automatizovaná. Obsahuje řadu měřících módů, pro nás nejdůležitější = mód $Cp - D$ (Paralelní kapacita – ztrátový činitel), za pomoci kterého měříme dané vlastnosti zkoumaného prvku.



Obr. 17 Princip měření se čtyřvodičovým vedením [7]

Grafické programové prostředí Agilent VEE Pro 8.0 (obr. 18 – ovládací software) ukládá naměřená data – hodnoty kapacity C_p a ztrátového činitele $tg \delta$ přímo do tabulkového procesoru Microsoft Excel.



Obr. 18 Programové prostředí Agilent VEE Pro 8.0

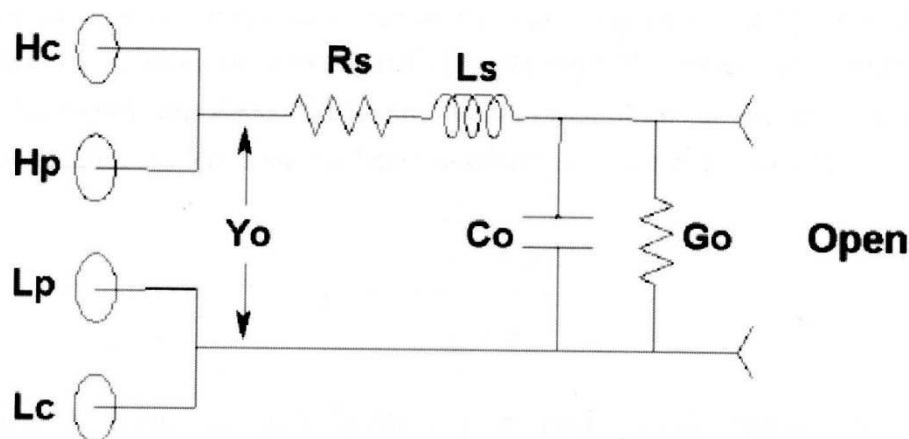
Při měření je nutné nastavit předepsané korekce. Přístroj je vybaven možností nastavení korekcí označených jako OPEN, SHORT, LOAD a délky vodičů, které slouží k přesnému nastavení počátečního stavu elektrodového systému. Korekce LOAD slouží pouze pro předem definované kmitočty a při měření nebyla využita. Před každým měřením je nutné provést kalibraci, při které přístroj měří rozptylovou admitanci (korekce OPEN) a zbytkovou impedanci (korekce SHORT). Bez použití korekcí by byly do výsledků měření zahrnuty veškeré nežádoucí parazitní vlivy, které výsledek měření zkreslují. Elektrodový systém je připojen čtyřvodičovým vedením. Konektory jsou označeny písmeny H_{Cur} , H_{Pot} (pro napěťovou elektrodu) a L_{Cur} , L_{Pot} (pro měřící elektrodu) [8].

Korekce OPEN

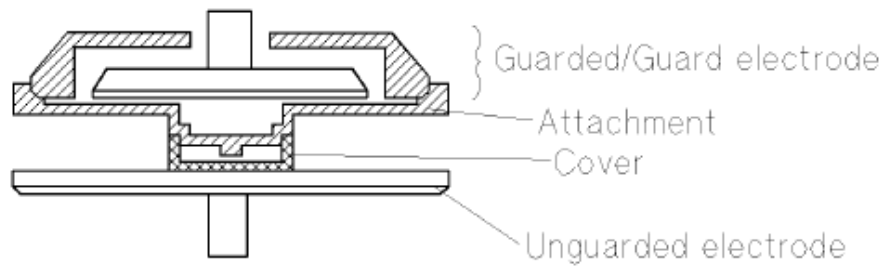
Korekce OPEN (naprázdno) slouží k eliminaci parazitní kapacity C_p (obr. 19 a rovnice (33)) je označena jako C_0 mezi vodiči měřícího zařízení a elektrodového systému. Pro její nastavení se používá speciální kalibrační elektroda s izolační krytkou, která od sebe oddělí elektrody elektrodového systému. Přístroj poté změří rozptylovou admitanci Y_0 , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 \quad (33)$$

kde G_0 je parazitní vodivost mezi vodiči propojení. Popsaná situace je znázorněna na obr. 19. R_S je parazitní impedance vodičů a L_S je parazitní indukčnost vodičů.



Obr. 19 Schéma zapojení při měření rozptylové admitance Y_0 [8]



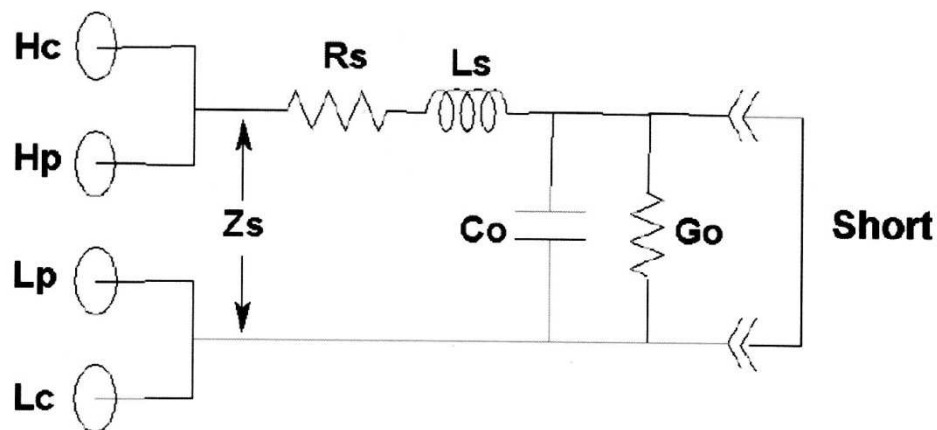
Obr. 20 Znáznornění umístění speciální kalibrační elektrody s izolační krytkou [8]

Korekce SHORT

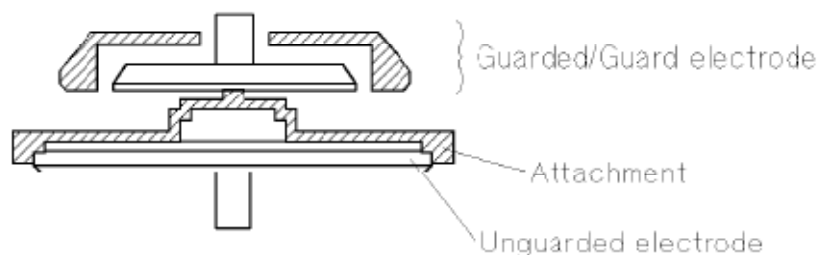
Korekce SHORT (nakrátko) slouží k eliminaci parazitní impedance R_S vodičů propojení měřícího zařízení a elektrodového systému. Pro její nastavení se používá speciální kalibrační elektroda, která zkratuje napěťovou a měřící elektrodu elektrodového systému. Přístroj poté změří ztrátovou impedanci Z_S , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Z_S = R_S + j\omega L_S \quad (34)$$

Popsaná situace je znázorněna na obr. 21. Ztrátová impedance Z_S představuje odpor svorek, konektorů a pájených spojů.



Obr. 21 Schéma zapojení při měření ztrátové impedance Z_S [8]



Obr. 22 Znárodnění umístění speciální kalibrační elektrody s izolační krytkou [8]

Hodnoty rozptylové admittance Y_0 a ztrátové impedance Z_S získané při provedení korekcí OPEN a SHORT se uloží do paměti měřicího přístroje. Při měření je v hodnotě změřené impedance Z_m , kromě impedance zkušební vzorku Z_{vz} , obsažena i rozptylová admittance Y_0 a ztrátová impedance Z_S . Velikost změřené impedance vyjadřuje rovnice [9]:

$$Z_m = Z_S + \frac{\frac{1}{Y_0} \cdot Z_{vz}}{\frac{1}{Y_0} + Z_{vz}} \quad (35)$$

Vzhledem k tomu, že jsou hodnoty parazitních prvků známy, lze algebraickou úpravou předchozího výrazu vyjádřit skutečnou hodnotu impedance vzorku, pro kterou platí výraz:

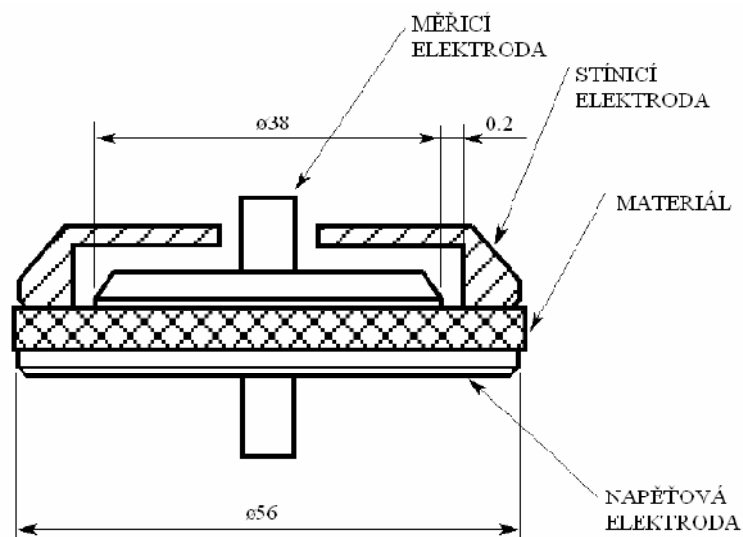
$$Z_m = \frac{\frac{1}{Y_0} \cdot (Z_m - Z_S)}{Z_S - Z_m + \frac{1}{Y_0}} = \frac{Z_m - Z_S}{1 + (Z_S - Z_m) \cdot Y_0} \quad (36)$$

2.2.2 Elektrodotý systém

Pro měření složek komplexní permitivity zkušebních vzorků v kmitočtové oblasti byl použit přesný LCR metr firmy Agilent E4980A, který využívá tříelektrodotý rovinný systém Agilent 16451B. Teplotní rozsah použití uvedeného elektrodotého systému se pohybuje od $-40\text{ }^\circ\text{C}$ do $+70\text{ }^\circ\text{C}$.

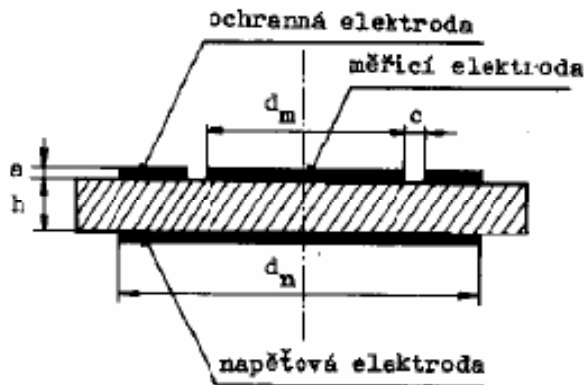


Obr. 23 Tříelektrokový systém 16451B [8]



Obr. 24 Řez tříelektrodeovým měřicím systémem [8]

Daný elektrodeový systém se používá pro měření elektrických vlastností rovinných vzorků pro měření stejnosměrným, jakož i střídavým elektrickým polem na mostech do kmitočtu cca 10^6 Hz. Tříelektrodeový rovinný systém je tvořen napěťovou a měřicí elektrodou kruhového tvaru a ochrannou elektrodou ve tvaru mezikruží. Použití ochranné elektrody snižuje vliv okrajové a zemní kapacity měřicí elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu na výsledek měření. Účinnost ochranné elektrody je tím větší, čím menší je rozdíl potenciálů a mezera mezi měřicí a ochrannou elektrodou. Základní uspořádání systému je na obr. 25 [9].



Obr. 25 Tříelektrokový rovinný systém [9]

Pro rozměry elektrodového systému platí doporučení normy. Šířka ochranné elektrody nesmí být menší než dvojnásobek tloušťky vzorku a mezera mezi ochrannou a měřicí elektrodou má být co nejmenší ($c \leq 2h$). Doporučuje se šířka ochranné elektrody minimálně 10 mm a šířka mezery 1 až 2 mm. Průměr napěťové elektrody nesmí být menší než vnější průměr ochranné elektrody.

Pro výpočet relativní permitivity platí:

$$\varepsilon'_{(r)} = \frac{C_p}{C_0} \quad (37)$$

C_p je kapacita měřeného kondenzátoru s vloženým dielektrikem (naměřená hodnota), C_0 je geometrická kapacita, tj. geometricky shodného měřicího systému, u něhož je místo původního dielektrika vakuum (vypočtená hodnota z rozměrů elektrod)

Geometrická kapacita C_0 tříelektrodeového systému je:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} \quad (38)$$

kde h je tloušťka vzorku a S_{ef} je efektivní plocha měřicí elektrody, pro níž platí:

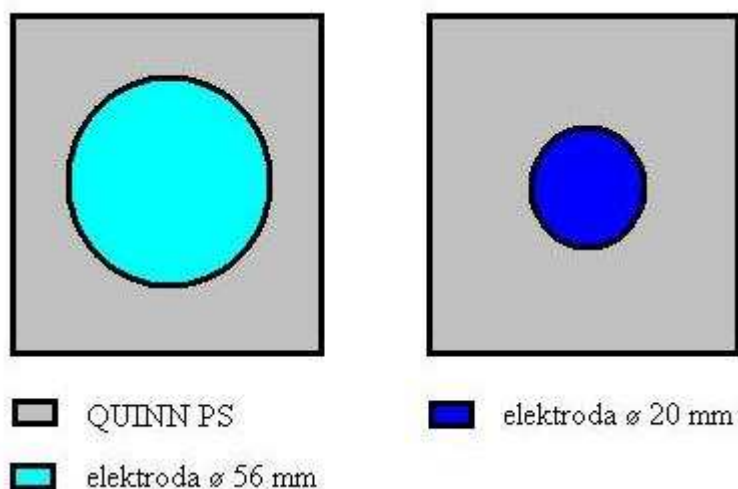
$$S_{ef} = \pi \cdot \frac{(d_m + B \cdot c)^2}{4} \quad (39)$$

d_m je průměr měřící elektrody, c je šířka vzduchové mezery mezi ochrannou a měřící elektrodou, B je součinitel (korekční činitel), který je pro $a < h$ roven jedné a pro $a \ll h$ se počítá ze vztahu:

$$B = 1 - 2,932 \frac{h}{c} \log \cos \left(0,7854 \frac{c}{h} \right) \quad (40)$$

2.3 Postup měření experimentu

Ke stanovení permitivity a ztrátového činitele se nejlépe hodí vzorky vyrobené z desek. Při měření permitivity se požaduje velká přesnost, největším zdrojem nepřesnosti jsou rozměry vzorků, zvláště tloušťka. Vzorek desky musí být dostatečně velký, aby bylo možné měřit s dostatečnou přesností. K dosažení přesnosti $\pm 1\%$ se volí tloušťka 1,5 mm, pro větší přesnost je žádoucí zvětšení tloušťky (např. na 6 mm až do 12 mm). Tloušťku měříme v bodech systematicky rozdělených po ploše vzorku určeného k měření elektrických veličin. Zvolená plocha vzorku musí být tak velká, aby kapacita vzorku byla změřena s požadovanou přesností.



Obr. 26 Zobrazení plochy určené pro n – počet měření pomocí mikrometru

Měřící prostředí

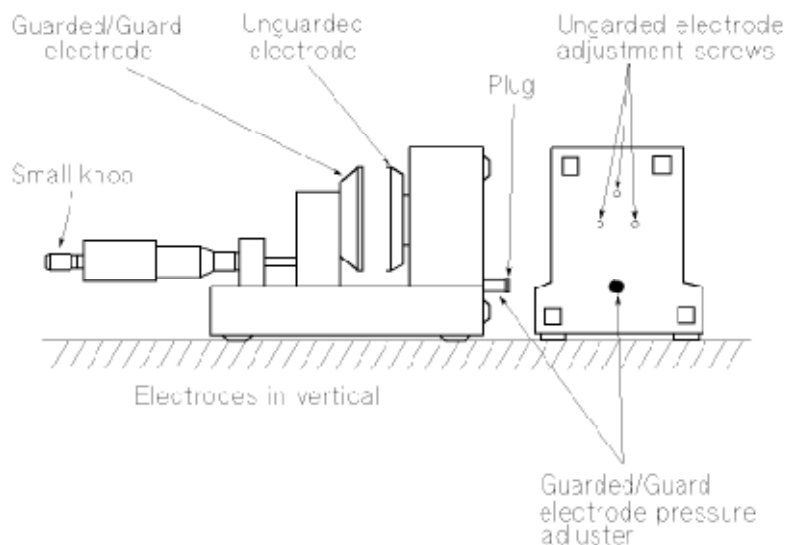
Veškerá měření se uskutečnila v prostředí s průměrnou teplotou 22,3 °C, při relativní vlhkosti vzduchu 36,5 % a atmosférickém tlaku 1027,2 hPa.



Obr. 27 Přístroj pro měření teploty, vlhkosti a tlaku

Při experimentu byly posuzovány hodnoty parazitní kapacity a ztrátového činitele u vzorků desek QUINN PS, následovně pak vypočítané složky komplexní permitivity v závislosti na frekvenci a nakonec zohledněn vliv vzduchové mezery na rozhraní elektroda – materiál. Vzorky byly proměřovány LCR metrem HP E4980A propojeným s výše popsaným třielektrodovým systémem. Přístroj bylo nutné zapnout 30 minut před vlastním měřením z důvodu vyhřátí a ustálení na provozní teplotu. Během této doby jsme vždy provedli kalibraci a počáteční nastavení elektrodového systému:

- a) v prvním případě jsme seřídili mikrometr na hodnotu „0“
- b) dále na mikrometru nastavili hodnotu 10 μm (0,01 mm) = velikost vzduchové mezery mezi elektrodami
- c) nakonec pomocí tří elektrodových šroubků vyrovnali spodní elektrodu a nastavili patřičnou hodnotu kapacity C_p



Obr. 28 Vertikální poloha a elektrodové šrouby pro seřízení [8]

Tab. 5 Hodnoty C_p a Y_0 , Z_S korekcí OPEN, SHORT pro oba typy elektrod

	Velikost elektrody [mm]	
	Ø 38	Ø 5
Katalogová hodnota C_p [pF]	700 - 1000	12 - 17
Nastavená hodnota C_p [pF]	905,50	15,81
Korekce OPEN Y_0 [pS]	19,46	18,12
Korekce SHORT Z_S [Ω]	$7,36 \cdot 10^{-6}$	$31,38 \cdot 10^{-3}$

V ovládacím programu byl nastaven požadovaný kmitočet od 20 Hz do 2 MHz, počet změřených hodnot na dekádu byl 10. Po spuštění probíhal proces měření automatizovaně a změřené hodnoty byly vyhodnocovány a ukládány ve formě tabulky programu Microsoft Excel do počítače. Měření kmitočtové závislosti probíhalo v souladu se zadáním práce jednak s korekcemi, abychom omezili parazitní vlivy a poté bez korekcí, pro výsledné posouzení experimentu.

2.4 Výsledky měření

Výsledky složek komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu při měření bez korekcí (OFF, OFF) a s korekcemi (OPEN, SHORT) pro dva typy elektrod (\varnothing 38 mm, \varnothing 5 mm) byly pro zkušební deskové vzorky krystalického polystyrenu vyjádřeny grafickou formou pomocí závislostí $\varepsilon' = F(f)$, $\varepsilon'' = F(f)$, $\varepsilon''' = F(\varepsilon')$. Pro přehlednější zpracování byly grafické závislosti permitivity na kmitočtu vynášeny pro měřený frekvenční rozsah 20 Hz – 2 MHz zcela náhodně, neboť při určitých kmitočtech byly výsledky měření zatíženy velkou chybou.

Na obr. 29 až 37 jsou uvedeny kmitočtové závislosti relativní permitivity, ztrátového čísla a Coleho – Coleho diagramy pro sady vzorků tloušťky 2, 3 a 6 mm bez korekcí (OFF, OFF) a na obr. 38 až 46 s korekcemi (OPEN, SHORT) pro průměr elektrody 38 mm. Pro úplnost je na obr. 47 zobrazena závislost $\varepsilon' = F(f)$ pro všechny tloušťky vzorku 2, 3, 6 mm při měření bez korekcí (OFF, OFF) a s korekcemi (OPEN, SHORT); na obr. 48 pak závislost $\varepsilon' = F(f)$ pro tloušťku vzorku 2 mm bez korekcí (OFF, OFF) pro oba průměry elektrod 38 mm a 5 mm. Korekční součinitel B můžeme považovat rovný „1“, neboť jeho hodnota je rozdílná až v řádech statisíců, což nemá naprosto žádný vliv na výslednou plochu kruhových elektrod S_{ef} . Jeho vypočítané hodnoty v závislosti na tloušťce vzorku jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Vypočítaná hodnota korekčního činitele „B“ v závislosti na tloušťce vzorku

Tloušťka [mm]	B [-] pro \varnothing 38 mm	B [-] pro \varnothing 5 mm
2	1,000011963	1,000007776
1,94	1,000012333	1,000008017
3	1,000007976	1,000005184
2,9	1,000008251	1,000005290
6	1,000003989	1,000002592
5,74	1,000004168	1,000000000

Vzhledem k rozsahu práce a velkého počtu změřených hodnot byly pro posouzení experimentu vybrány pouze výše uvedené grafické závislosti. Ze zobrazených závislostí lze poté v tabulkových souborech programu Microsoft Excel, které jsou nahrány na přiloženém digitálním médiu snadno vypracovat zbývající závislosti.

Příklad výpočtu hodnot:

➤ Pro elektrodu $\varnothing 38\text{mm}$ a tloušťku vzorku $h = 2\text{mm}$

$$S_{ef} = \pi \cdot \frac{(d_m + B \cdot c)^2}{4} = \pi \cdot \frac{(0,038 + 1,000011963 \cdot 0,0002)^2}{4} = 0,001146084 = \boxed{1146,08 \text{ mm}^2}$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,001146084}{0,002} = 5,073713868 \cdot 10^{-12} \text{ F} \doteq \boxed{5,07 \text{ pF}}$$

$$\varepsilon'_{(r)} = \frac{C_p}{C_0} = \frac{1,19 \cdot 10^{-11}}{5,07 \cdot 10^{-12}} = 2,347140039 = 2,347 \doteq \boxed{2,35}$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg } \delta = 2,347 \cdot 0,00028 = 0,00065716 \doteq \boxed{6,57 \cdot 10^{-4}}$$

Tab. 7 Vypočítané hodnoty elektrody $\varnothing 38\text{mm}$ pro $\text{tg } \delta$ při kmitočtu 1kHz

h [mm]	2	3	6	1,94	2,9	5,74
S_{ef} [mm²]	1146,08			1146,08		
C_0 [pF]	5,07	3,38	1,69	5,23	3,50	1,76
C_p [pF]	11,90	8,23	4,44	12,70	8,62	4,47
tg δ [-]	$3,20 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$
ε' [-]	2,35	2,44	2,63	2,51	2,46	2,54
ε'' [-]	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$8,46 \cdot 10^{-4}$	$5,17 \cdot 10^{-4}$	$8,03 \cdot 10^{-4}$	$8,86 \cdot 10^{-4}$	$5,59 \cdot 10^{-4}$

Tab. 8 Změřené hodnoty „vzorku č.1“ u elektrody Ø 38mm při frekvenci 1 kHz

	Bez korekce [OFF, OFF]			Korekce [OPEN, SHORT]		
h [mm]	2	3	6	2	3	6
C_P [pF]	12,74	8,62	4,47	11,88	8,23	4,44
tg δ [-]	3,20.10 ⁻⁴	3,60.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁴	3,50.10 ⁻⁴	3,80.10 ⁻⁴	2,10.10 ⁻⁴
ε' [-]	2,51	2,55	2,64	2,34	2,43	2,63
ε'' [-]	8,10.10 ⁻⁴	9,10.10 ⁻⁴	5,90.10 ⁻⁴	8,20.10 ⁻⁴	9,30.10 ⁻⁴	5,40.10 ⁻⁴
h [mm]	1,94	2,9	5,74	1,94	2,9	5,74
C_P [pF]	12,74	8,62	4,47	11,87	8,23	4,44
tg δ [-]	3,20.10 ⁻⁴	3,60.10 ⁻⁴	2,20.10 ⁻⁴	3,50.10 ⁻⁴	3,80.10 ⁻⁴	2,10.10 ⁻⁴
ε' [-]	2,44	2,46	2,53	2,27	2,35	2,51
ε'' [-]	7,90.10 ⁻⁴	8,80.10 ⁻⁴	5,60.10 ⁻⁴	7,90.10 ⁻⁴	9,00.10 ⁻⁴	5,20.10 ⁻⁴

➤ Pro elektrodu Ø 5 mm a tloušťku vzorku h = 2mm

$$S_{ef} = \pi \cdot \frac{(d_m + B \cdot c)^2}{4} = \pi \cdot \frac{(0,005 + 1,000011963 \cdot 0,00013)^2}{4} = 0,000020669 = \boxed{20,70 \text{ mm}^2}$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,001146084}{0,002} = 9,150280277 \cdot 10^{-14} \text{ F} \doteq \boxed{91,50 \text{ fF}}$$

$$\varepsilon'_{(r)} = \frac{C_p}{C_0} = \frac{260 \cdot 10^{-15}}{91,5 \cdot 10^{-15}} = 2,841530055 = 2,842 \doteq \boxed{2,84}$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg } \delta = 2,842 \cdot 0,002739 = 0,007784238 \doteq \boxed{77,84 \cdot 10^{-4}}$$

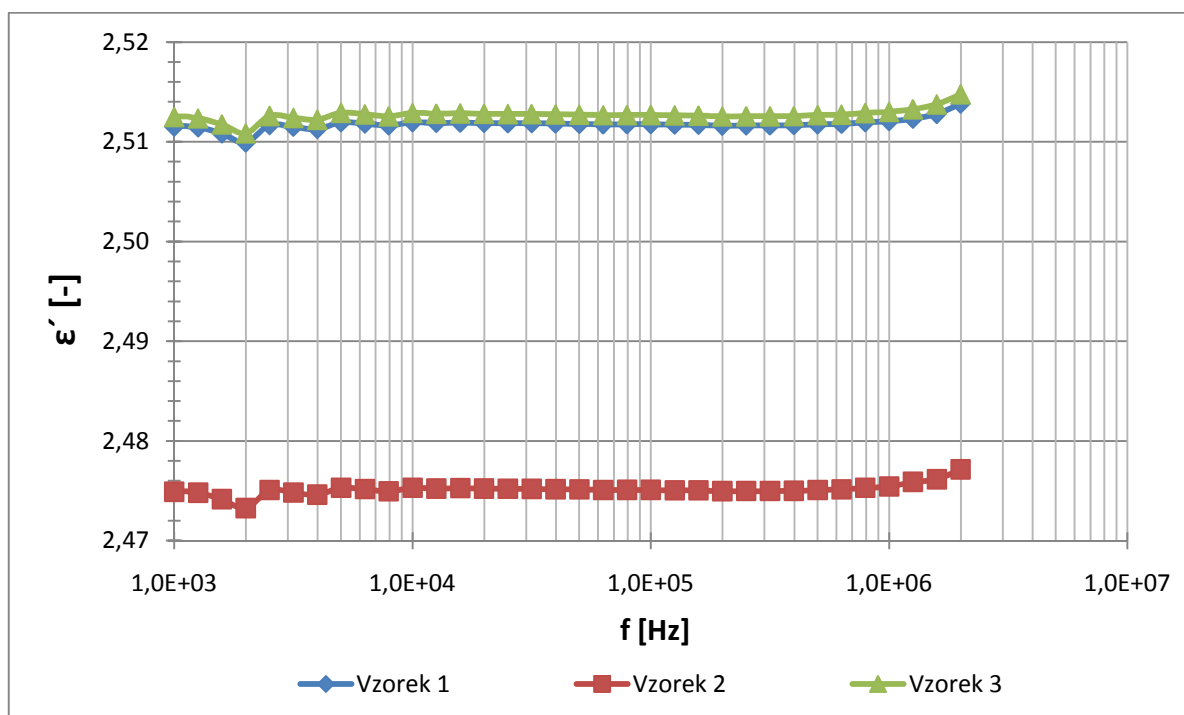
Tab. 9 Vypočítané hodnoty pro elektrodu Ø 5mm pro tg δ při kmitočtu 1kHz

h [mm]	2	3	6	1,94	2,9	5,74
S_{ef} [mm²]	20,70			20,70		
C₀ [fF]	91,50	61,08	30,54	94,46	63,19	31,92
C_p [fF]	260	177	96	259	177	96,3
tg δ [-]	42,00.10 ⁻⁴	52,90.10 ⁻⁴	86,52.10 ⁻⁴	42,00.10 ⁻⁴	52,90.10 ⁻⁴	86,52.10 ⁻⁴
ε' [-]	2,84	2,90	3,14	2,74	2,80	3,02
ε'' [-]	119,28.10 ⁻⁴	153,41.10 ⁻⁴	271,67.10 ⁻⁴	115,08.10 ⁻⁴	148,12.10 ⁻⁴	261,29.10 ⁻⁴

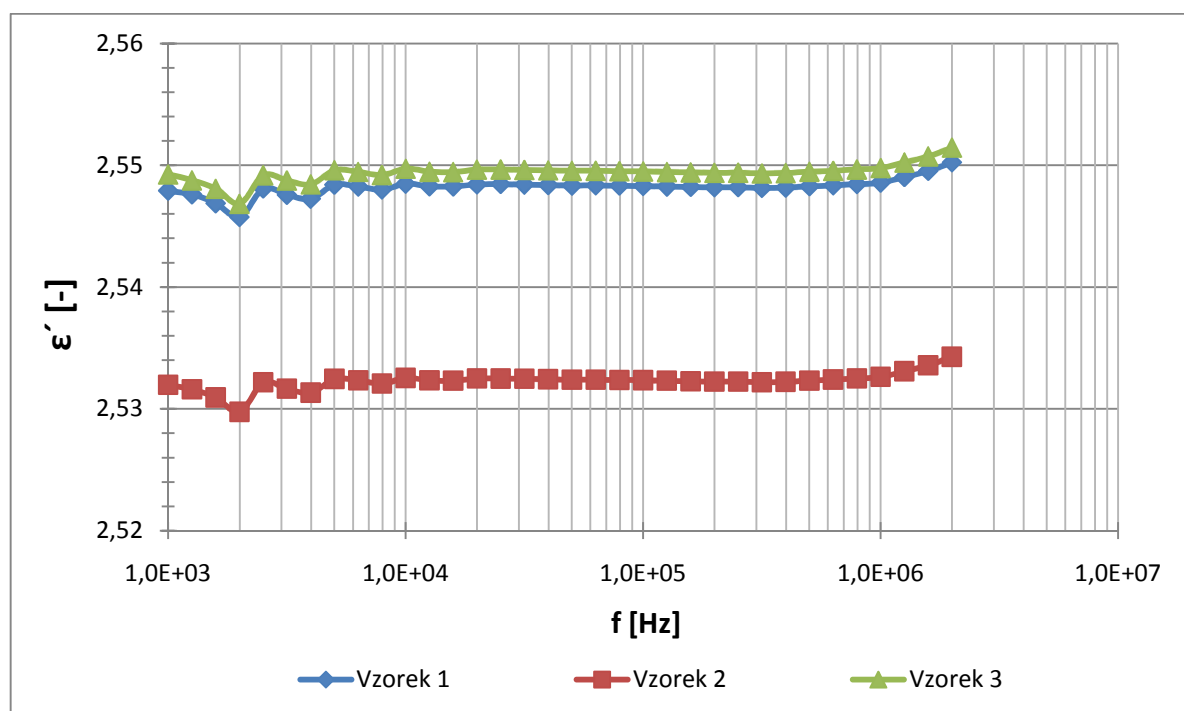
Tab. 10 Změřené hodnoty „vzorku č.1“ u elektrody Ø 5mm při frekvenci 1 kHz

	Bez korekce [OFF, OFF]			Korekce [OPEN, SHORT]		
h [mm]	2	3	6	2	3	6
C_p [fF]	258,00	178,00	95,25	258,73	176,31	95,30
tg δ [-]	42,00.10 ⁻⁴	52,90.10 ⁻⁴	86,52.10 ⁻⁴	39,00.10 ⁻⁴	49,00.10 ⁻⁴	96,80.10 ⁻⁴
ε' [-]	2,81	2,91	3,12	2,83	2,89	3,13
ε'' [-]	118,02.10 ⁻⁴	153,94.10 ⁻⁴	269,94.10 ⁻⁴	110,37.10 ⁻⁴	141,50.10 ⁻⁴	302,98.10 ⁻⁴
h [mm]	1,94	2,9	5,74	1,94	2,9	5,74
C_p [pF]	258,00	178,00	95,25	258,73	176,31	95,30
tg δ [-]	42,00.10 ⁻⁴	52,90.10 ⁻⁴	86,52.10 ⁻⁴	39.10 ⁻⁴	49,00.10 ⁻⁴	96,80.10 ⁻⁴
ε' [-]	2,73	2,81	2,99	2,74	2,79	2,99
ε'' [-]	114,07.10 ⁻⁴	148,69.10 ⁻⁴	258,70.10 ⁻⁴	106,86.10 ⁻⁴	136,80.10 ⁻⁴	289,43.10 ⁻⁴

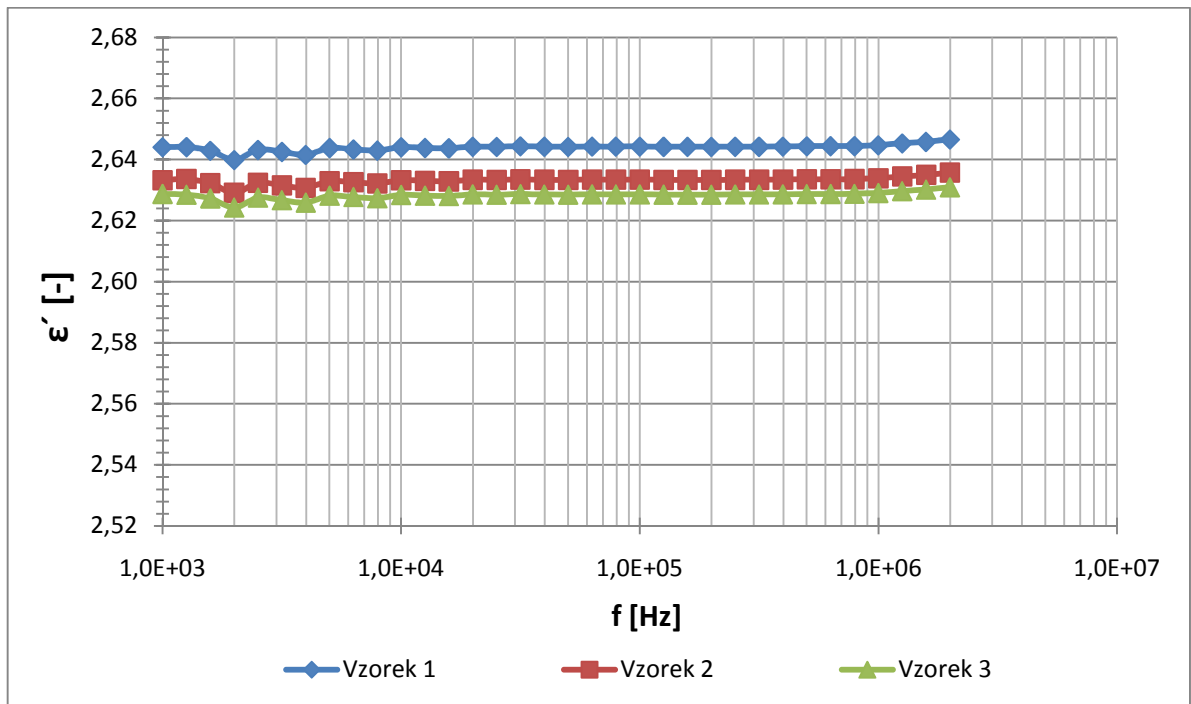
Grafické zpracování bez zahrnutí korekcí (OFF, OFF) pro elektrodu \varnothing 38 mm



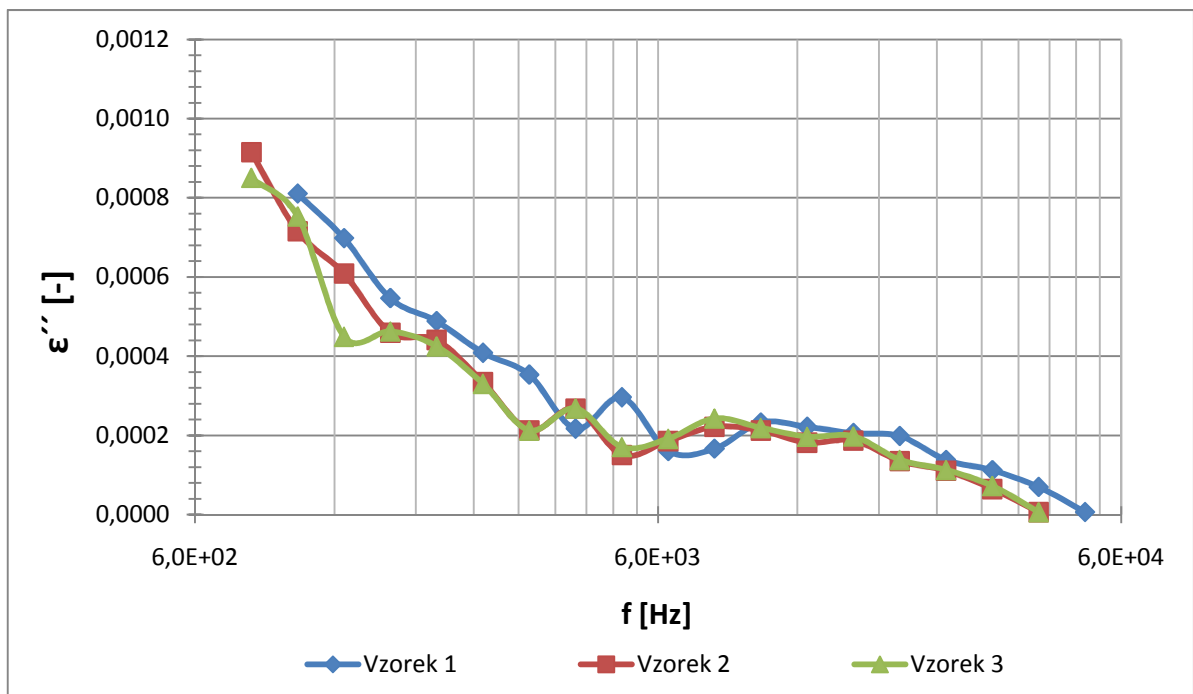
Obr. 29 Kmitočtová závislost ϵ' pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm



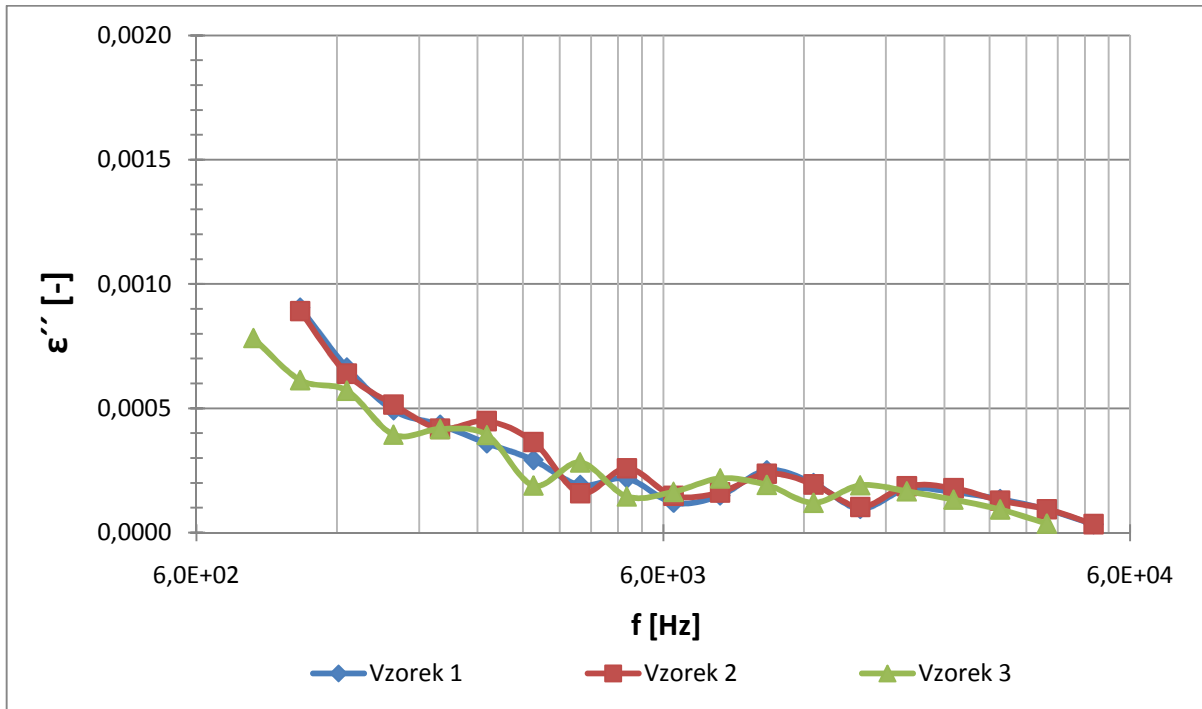
Obr. 30 Kmitočtová závislost ϵ' pro tloušťku vzorku $h = 3$ mm



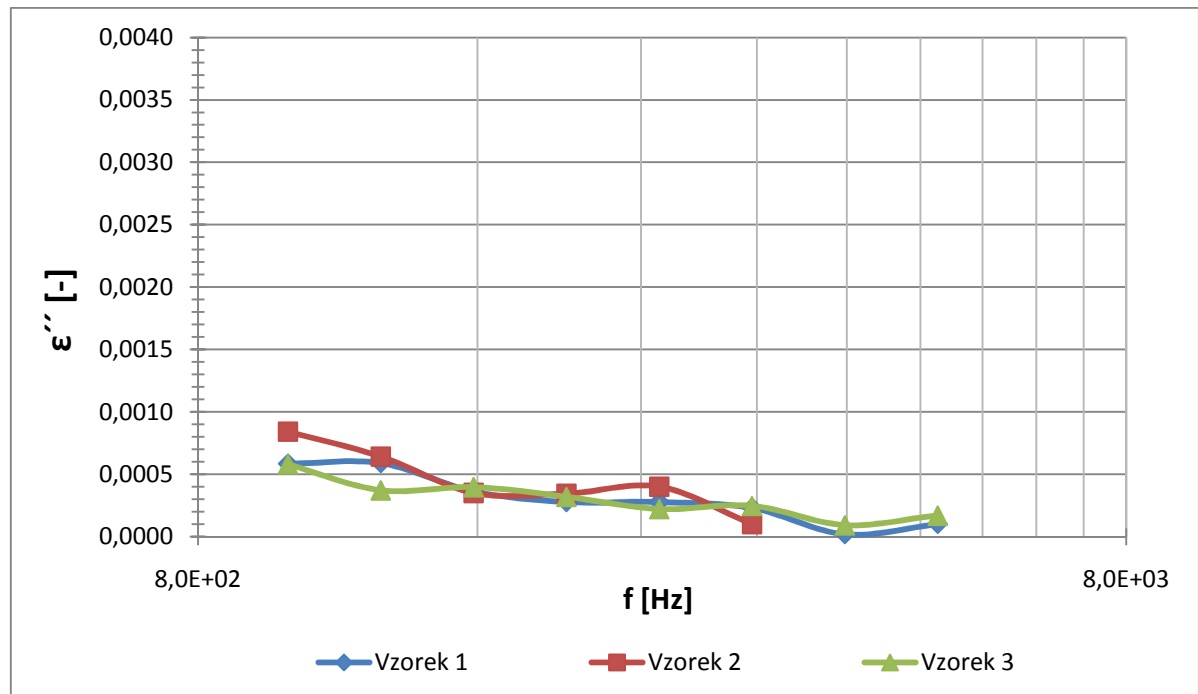
Obr. 31 Kmitočtová závislost ϵ' pro tloušťku vzorku $h = 6$ mm



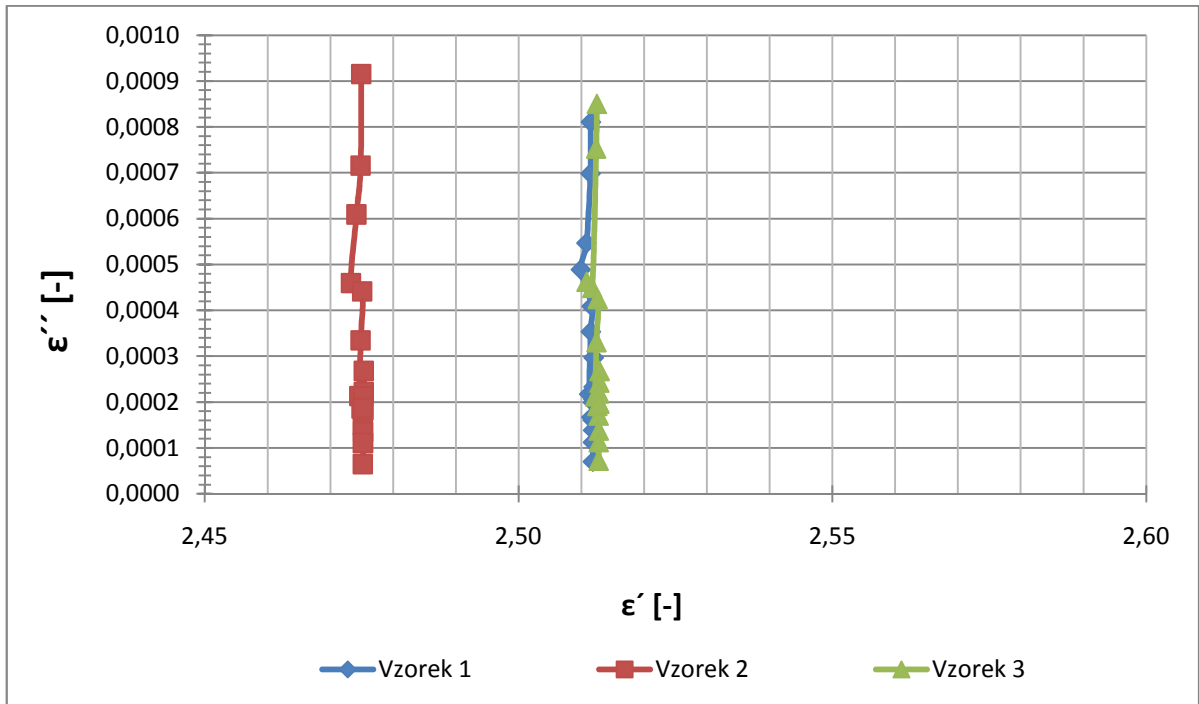
Obr. 32 Kmitočtová závislost ϵ'' pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm



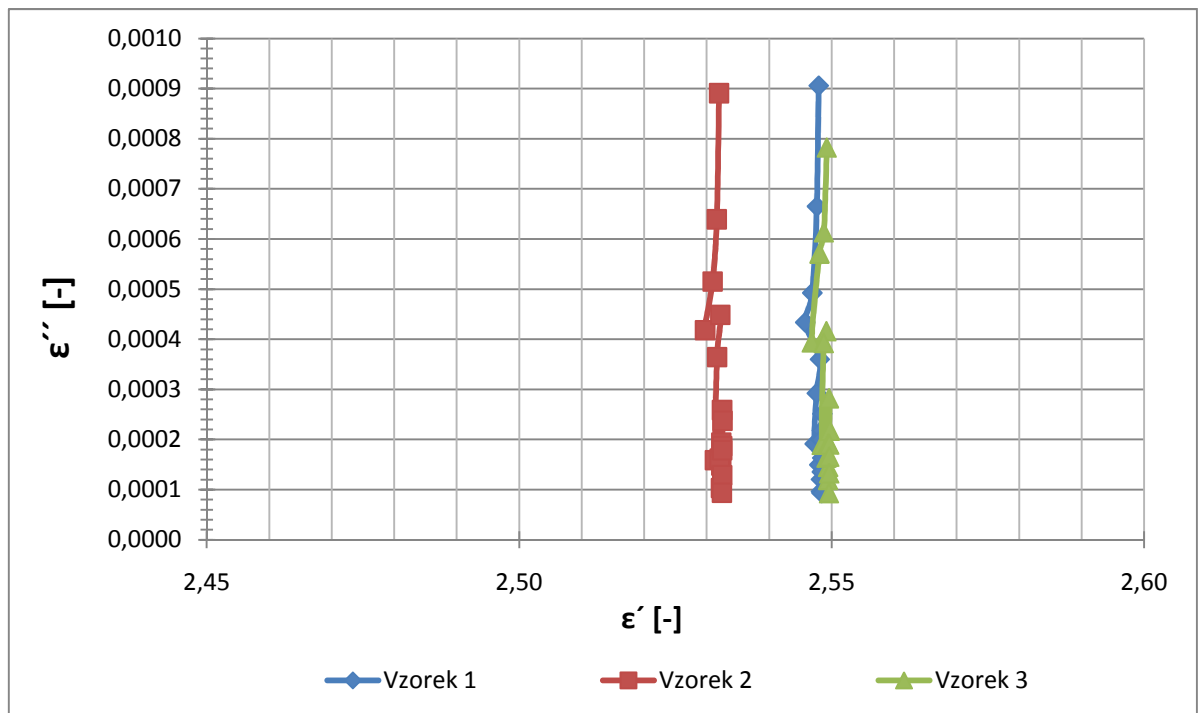
Obr. 33 Kmitočtová závislost ϵ'' pro tloušťku vzorku $h = 3$ mm



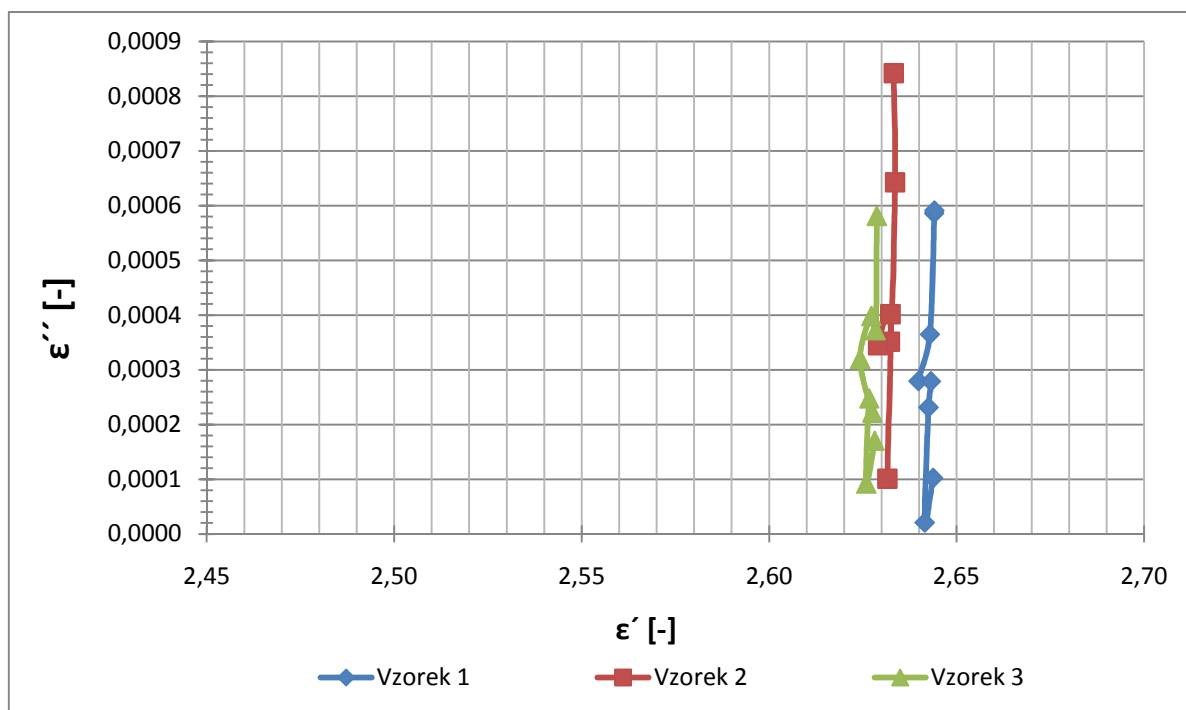
Obr. 34 Kmitočtová závislost ϵ'' pro tloušťku vzorku $h = 6$ mm



Obr. 35 Kmitočtová závislost $\epsilon'' = F(\epsilon')$ pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm

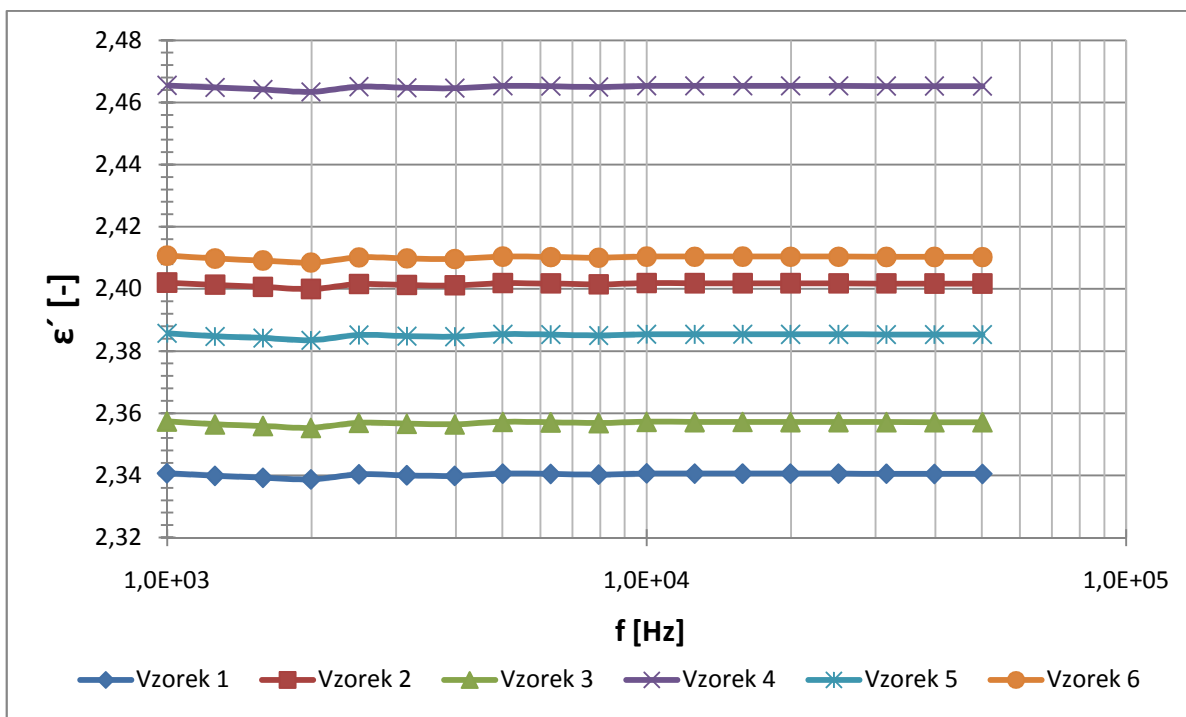


Obr. 36 Kmitočtová závislost $\epsilon'' = F(\epsilon')$ pro tloušťku vzorku $h = 3$ mm

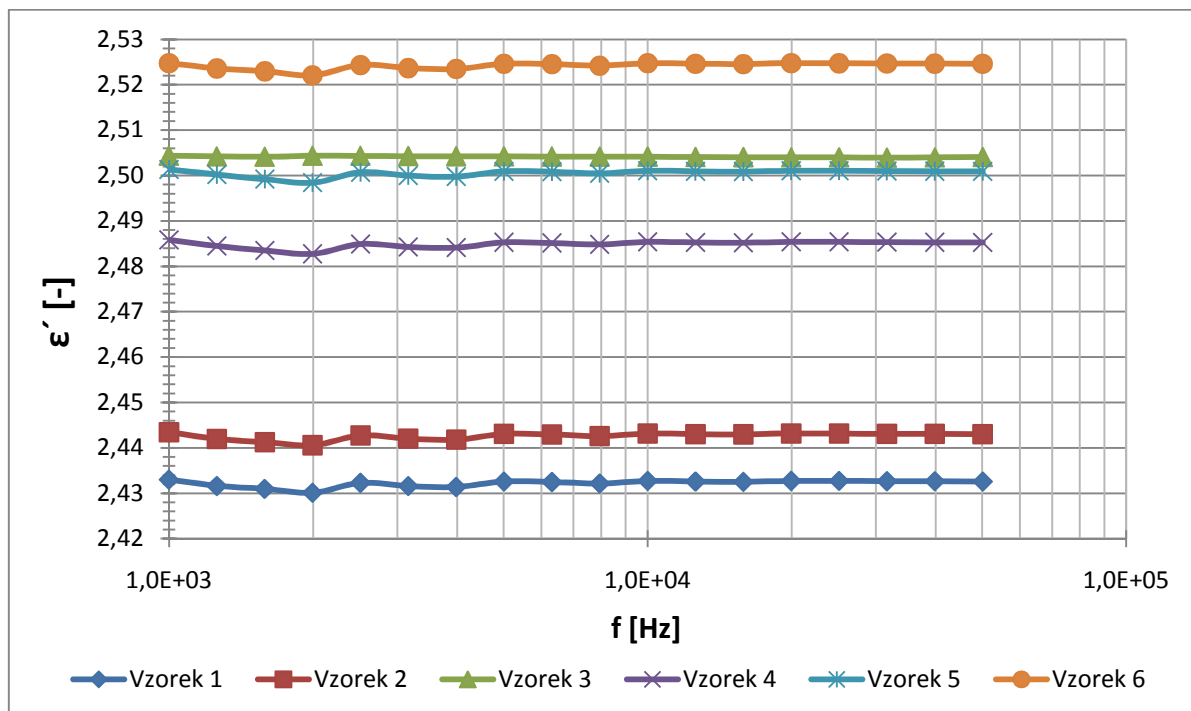


Obr. 37 Kmitočtová závislost $\epsilon'' = F(\epsilon')$ pro tloušťku vzorku $h = 6$ mm

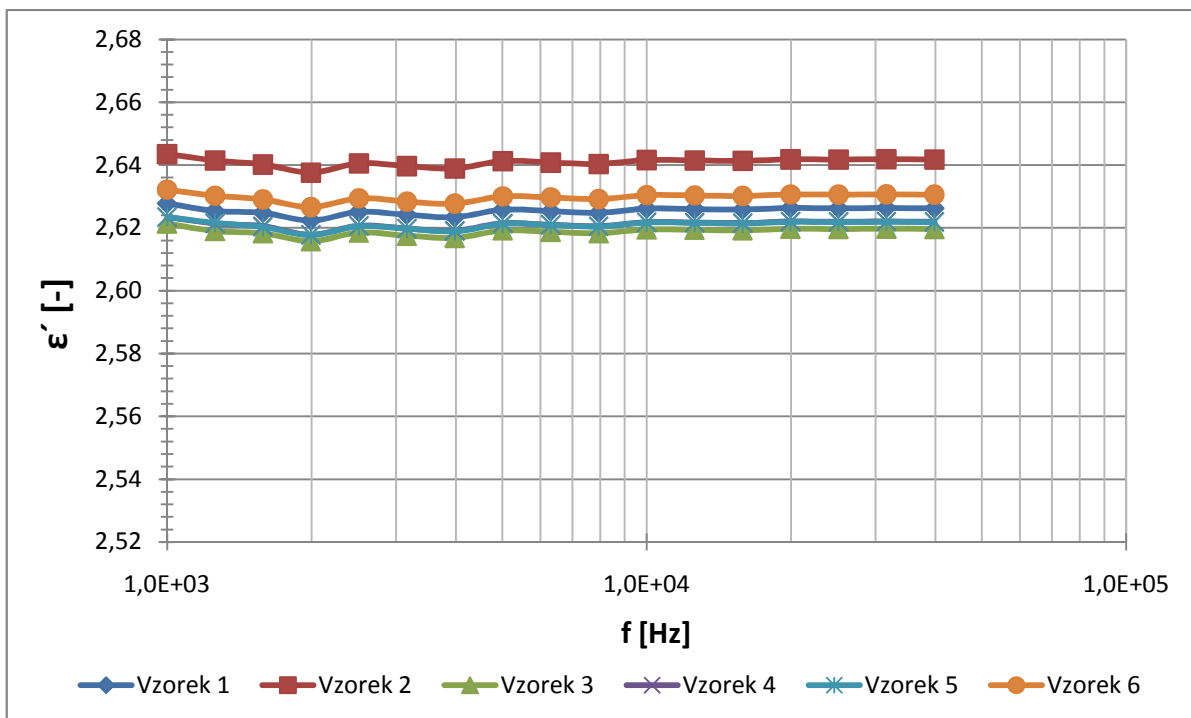
Grafické zpracování se zahrnutím korekcí (OPEN, SHORT) pro elektrodu $\varnothing 38$ mm



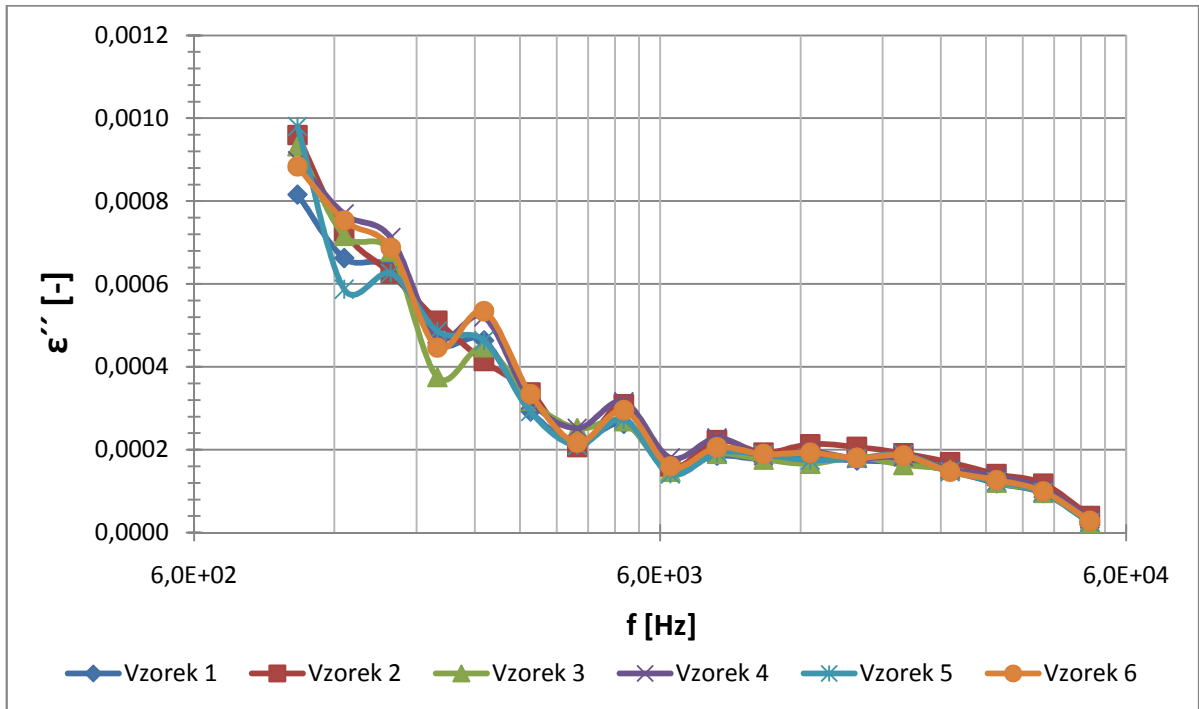
Obr. 38 Kmitočtová závislost ϵ' pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm



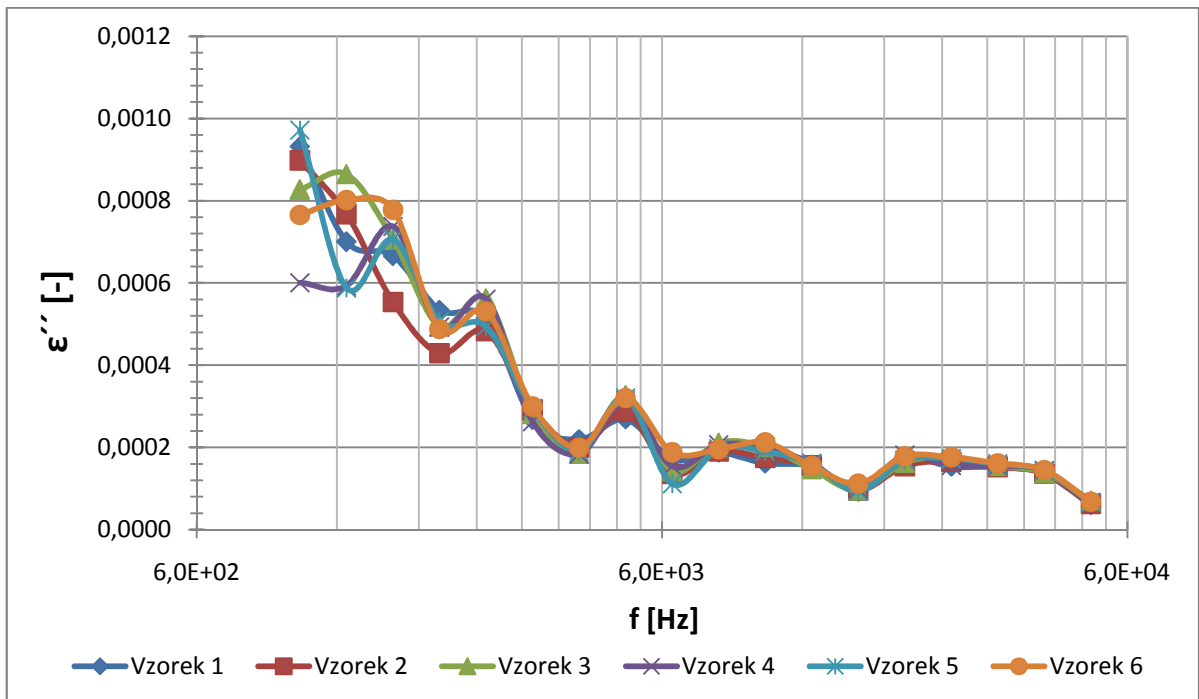
Obr. 39 Kmitočtová závislosť ϵ' pro tloušťku vzorku $h = 3$ mm



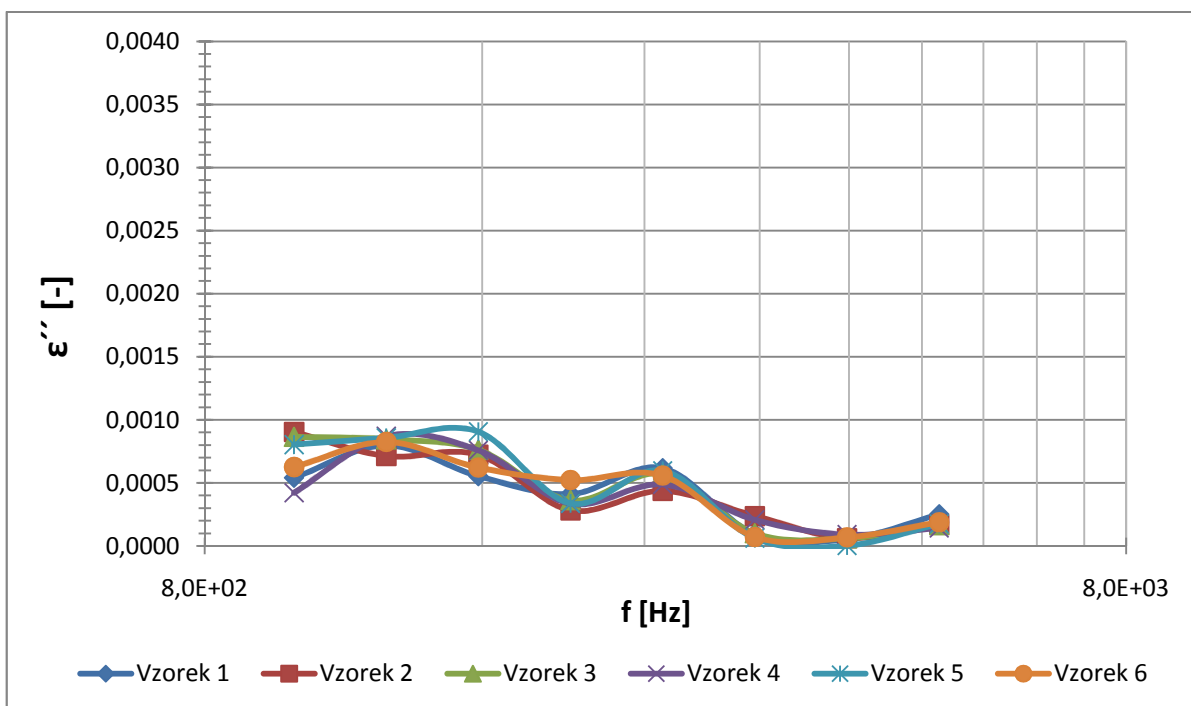
Obr. 40 Kmitočtová závislosť ϵ' pro tloušťku vzorku $h = 6$ mm



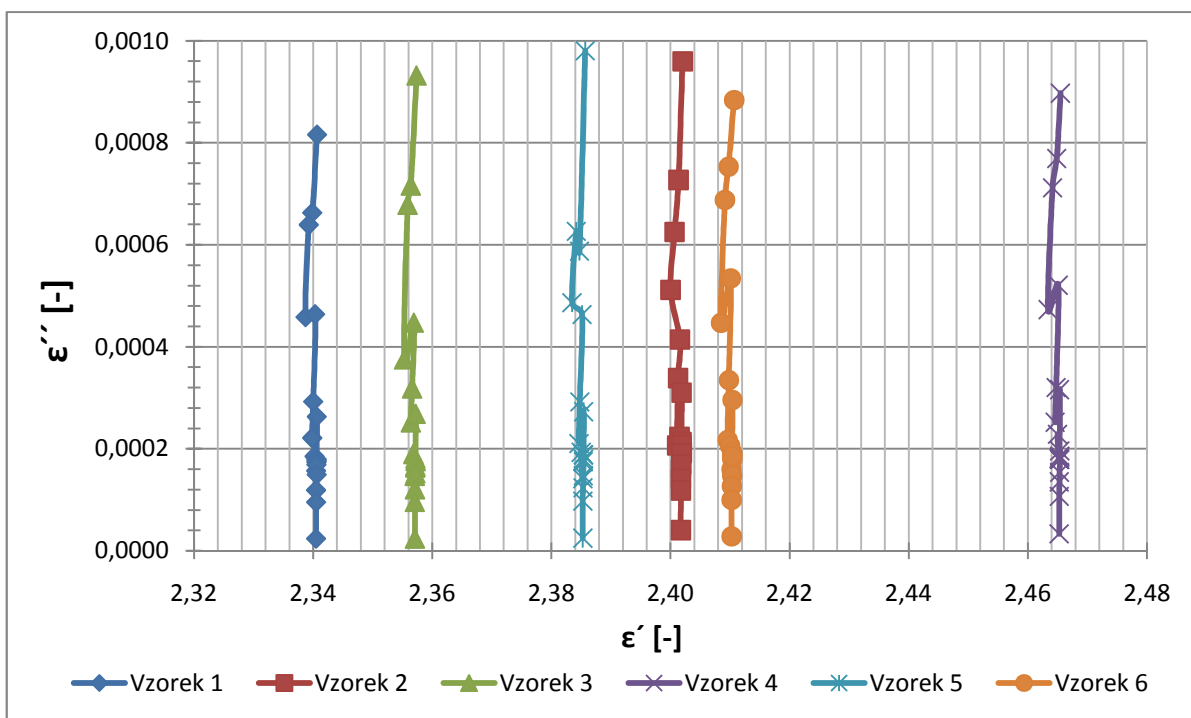
Obr. 41 Kmitočtová závislost ϵ'' pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm



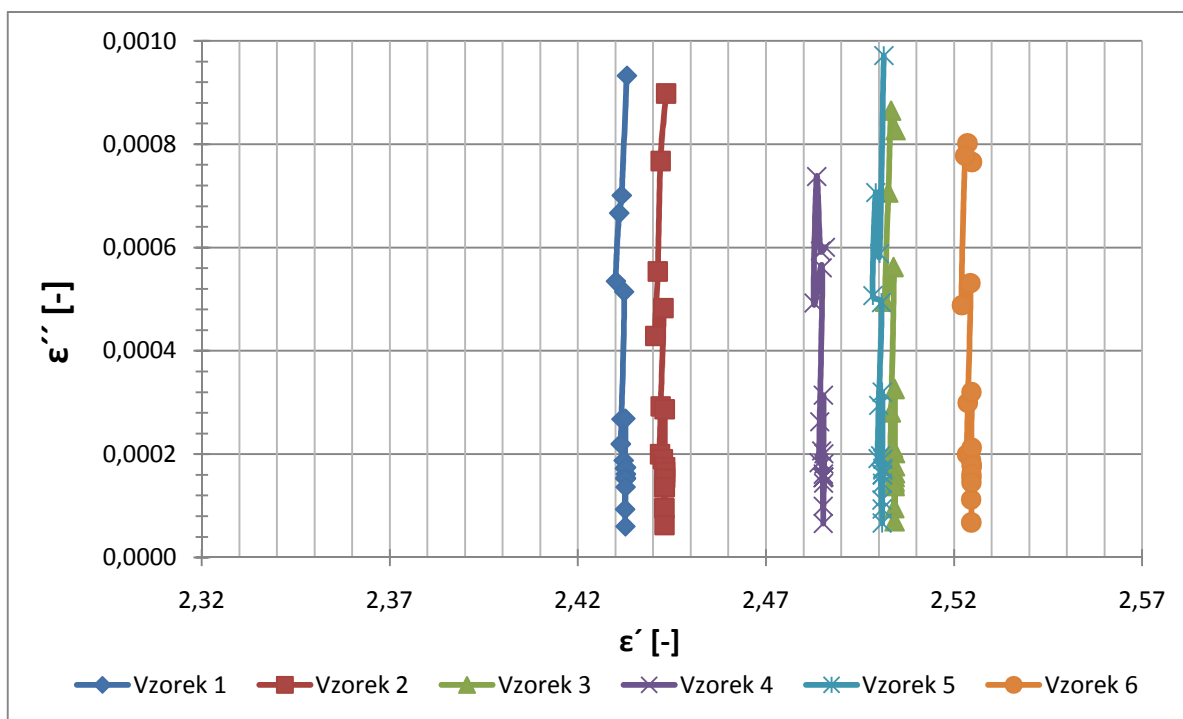
Obr. 42 Kmitočtová závislost ϵ'' pro tloušťku vzorku $h = 3$ mm



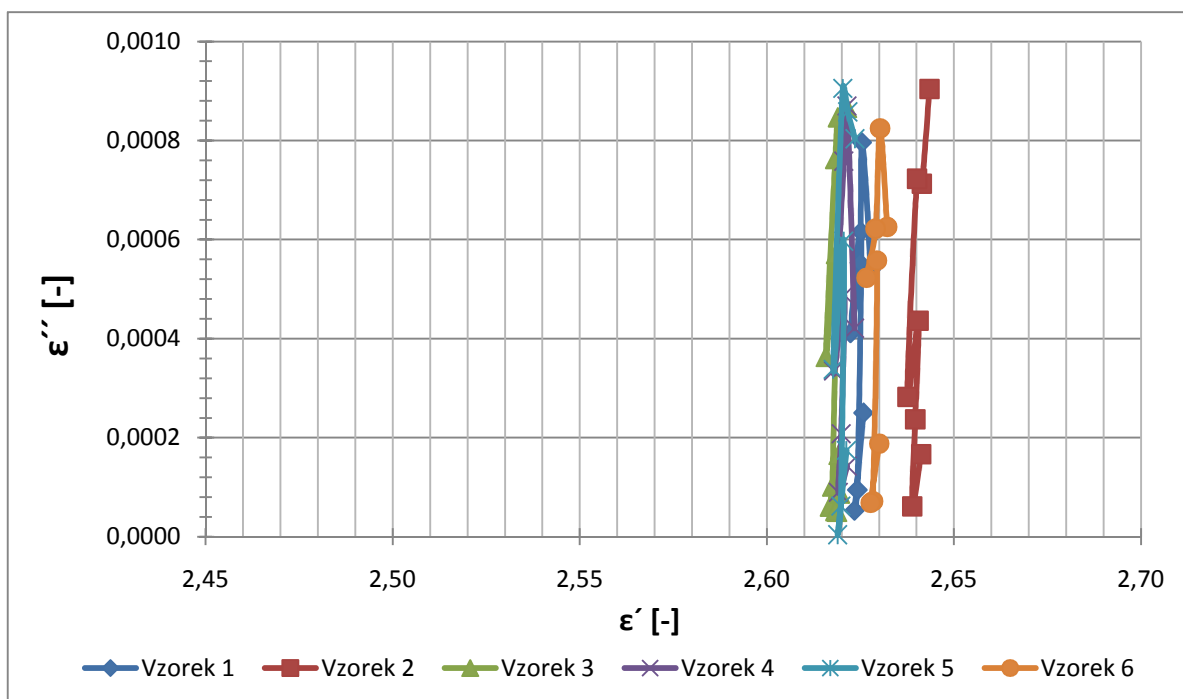
Obr. 43 Kmitočtová závislost ϵ'' pro tloušťku vzorku $h = 6$ mm



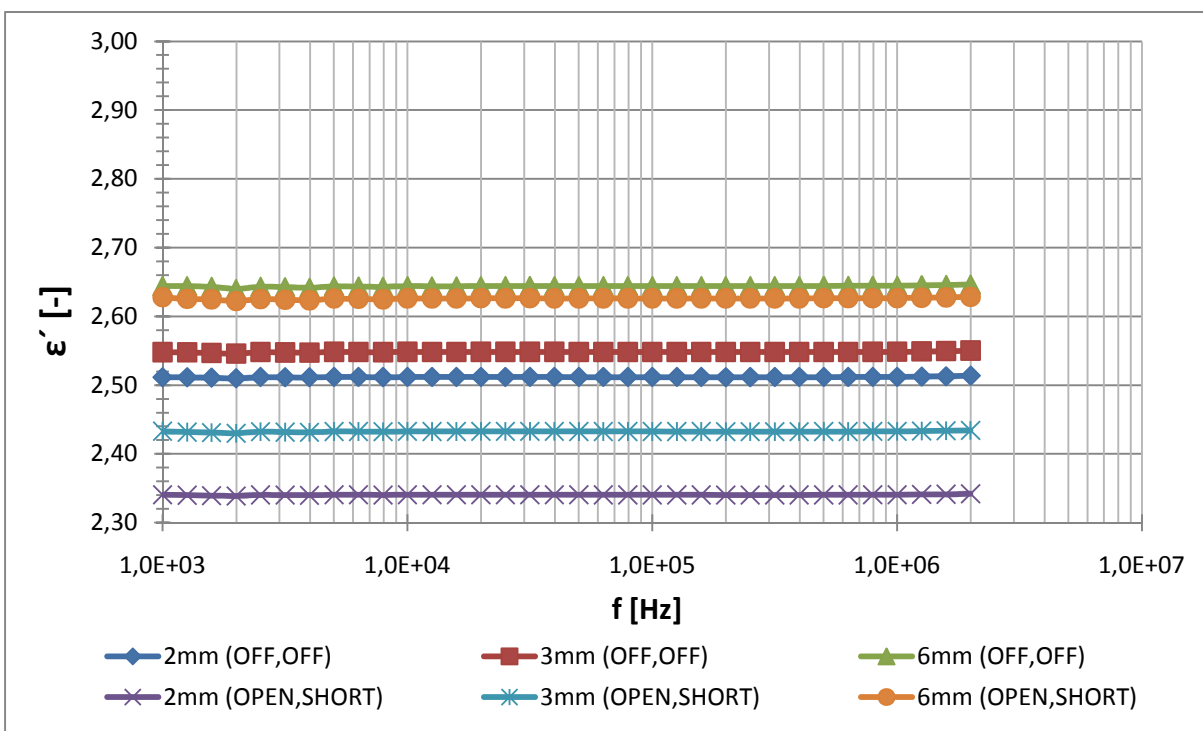
Obr. 44 Kmitočtová závislost $\epsilon'' = F(\epsilon')$ pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm



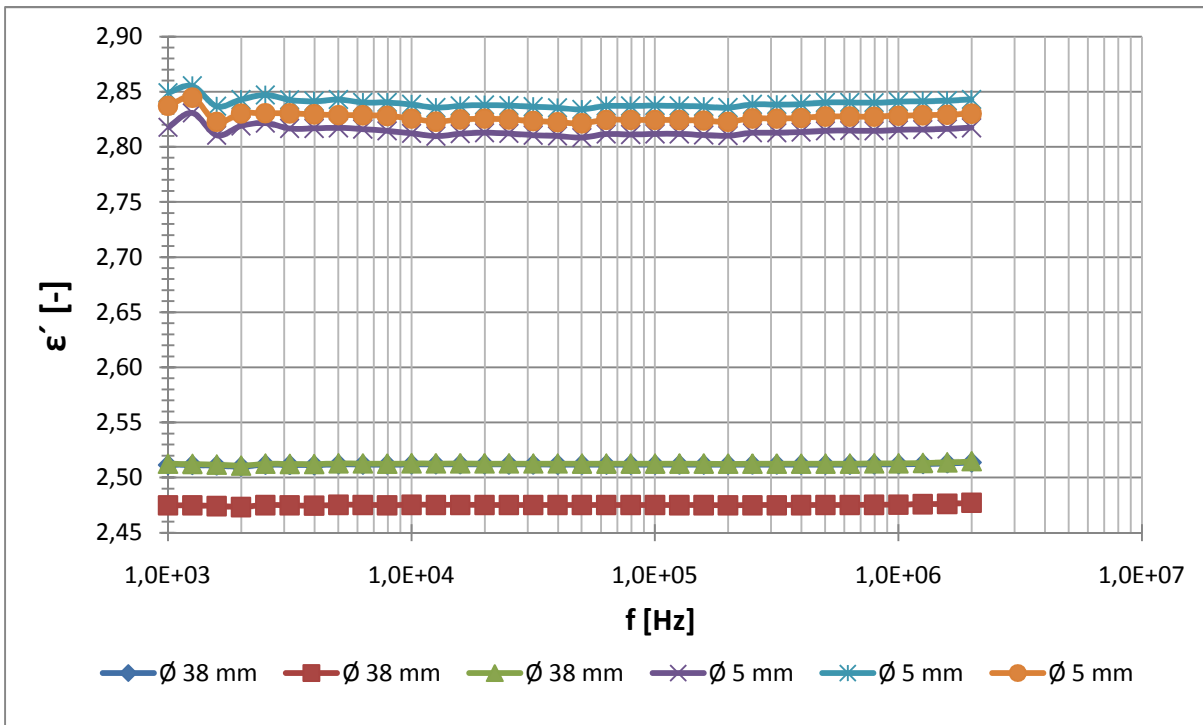
Obr. 45 Kmitočtová závislost $\epsilon'' = F(\epsilon')$ pro tloušťku vzorku $h = 3$ mm



Obr. 46 Kmitočtová závislost $\epsilon'' = F(\epsilon')$ pro tloušťku vzorku $h = 6$ mm



Obr. 47 Kmitočtová závislost $\epsilon' = F(f)$ pro $h = 2,3,6$ mm při měření s korekcí a bez korekce



Obr. 48 Kmitočtová závislost $\epsilon' = F(f)$ pro tloušťku vzorku $h = 2$ mm při měření bez korekce (OFF, OFF)

3 Závěr

Ze získaných výsledků je zjevné, že průběhy kmitočtových závislostí složek komplexní permitivity krystalického polystyrenu QUINN PS odpovídají teoretickým předpokladům. Hodnota relativní permitivity ϵ' a hodnota ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ jsou v daném kmitočtovém pásmu 20 Hz – 2 MHz prakticky konstantní v celém rozsahu. Hodnota ztrátového čísla ϵ'' roste až do relaxačního maxima a poté klesá s rostoucím kmitočtem. Z kmitočtových závislostí ϵ'' lze posoudit, že se vyskytují dvě relaxační maxima, a to přibližně okolo hodnot kmitočtů 800 Hz a 5 kHz. Tato skutečnost je patrná i z vytvořeného grafu závislosti $\operatorname{tg} \delta = F(f)$, který je dohledatelný v tabulkovém souboru Microsoft Excel na přiloženém digitálním médiu.

Celý experiment byl realizován při průměrné konstantní teplotě prostředí 22,3 °C. Měřené parametry parazitní kapacity C_P a ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ byly zaznamenávány pro šest opakovaných měření, ze kterých pak byla spočítána hodnota aritmetického průměru pro dané veličiny. Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ se v praxi využívá pro rychlé posouzení kvality daného materiálu. Za vhodné materiály se považuje hodnota $10^{-4} \div 10^{-3}$, za nevhodné $10^{-1} \div 10^0$. Z toho je patrné, že daný materiál QUINN PS lze považovat za vyhovující (naše hodnota $\operatorname{tg} \delta = 2$ až $4 \cdot 10^{-4}$ pro průměr elektrody 38 mm a $\operatorname{tg} \delta = 42$ až $98 \cdot 10^{-4}$ pro průměr elektrody 5 mm). Daný materiál vykazuje prakticky nulovou nasákavost a má nízkou hustotu $1,05 \text{ g/cm}^3$.

Měření dielektrických veličin ovlivňují různí činitelé. Vzhledem k možnosti vniku vzduchových mezer mezi zkoumaným vzorkem a přiloženými elektrodami hraje roli skutečná tloušťka vzorku. Vzhledem k nehomogenně vzorku je nutné dodržovat neměnnou polohu celého elektrodového systému během experimentu. Každá změna polohy může totiž znamenat zatížení experimentu různou chybou. Při zpracování naměřených hodnot je také nutné přihlídnout k chybám měřících přístrojů.

Zkušební vzorky byly posuzovány z hlediska použitého elektrodového systému, v našem případě se jedná o třibodový elektrodový systém s ochrannou elektrodou. Použití ochranné elektrody snižuje vliv okrajové ($C_E = 0$) a zemní kapacity měřící elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu na výsledek měření (korekční činitel pro přepočítání $B = 1$). Dále byly vzorky posuzovány z hlediska tří různých tloušťek materiálu, a to pro 2, 3 a 6 mm. Z hodnot uvedených v Tab. 7 až Tab. 10 je zřejmé; že parazitní kapacita C_P se s rostoucí tloušťkou snižuje, relativní permitivita ϵ' se zvyšuje, ale měření se zpřesňuje a ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ vzrůstá. Nakonec byl celý experiment posouzen z hlediska použitého typu elektrody, a to pro průměr elektrody 38 mm a 5 mm. Pro Ø38 mm je pokryta větší plocha vzorku

($S_{ef} = 1146 \text{ mm}^2$), tím pádem je i větší výsledná plocha vzduchové mezery, což se projeví větší parazitní kapacitou (řádově pF), ale výsledná relativní permitivita je přesnější. Naopak při $\varnothing 5 \text{ mm}$ je pokryta menší plocha měřeného vzorku ($S_{ef} = 20,7 \text{ mm}^2$), což vede ke zmenšení parazitní kapacity (řádově fF), ale výsledná relativní permitivita vzorku se zvětší.

Samozřejmě pokud bychom chtěli dosáhnout ještě větší přesnosti měření, jen nutné si uvědomit, že zejména u několika málo materiálů, k nimž patří i *polystyren* je třeba měřit ztrátový činitel a permitivitu při kmitočtech, při kterých bude daný materiál využíván. Jelikož se nám nepodařilo dohledat přesný rozsah permitivity pro daný materiál, z hlediska posouzení bereme v úvahu tabulkovou hodnotu polystyrenu $\epsilon_r = 2,6$. Za nejpřesnější měření lze tedy považovat materiál o tloušťce vzorku 6 mm (obr. 31 a obr. 40). Samotný fakt dokazuje i literatura zkoumané problematiky, kde je výslovně uvedeno, že *k dosažení větších přesností může být žádoucí zvětšení tloušťky vzorku např. 6 mm – 12 mm.*

4 Literatura

- [1] KAZELLE, J. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy: Elektronický učební text*. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004. 273 s.
- [2] JIRÁK, J. a kol. *Materiály a technická dokumentace: část Materiály v elektrotechnice*. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2003. 127 s.
- [3] HRAZDIL, J., *ČSN IEC 250*. Praha: Český normalizační institut, 1998, 32 s.
- [4] QUINN Plastics – *Technické údaje*. [cit. 2005-12-20] Dostupné z WWW: <http://www.quinn-plastics.sk/dosky/ps/cz-quinn-ps-technical-manual-20-12-2005.pdf>
- [5] MENTLÍK, V., *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [6] POLSTEROVÁ, H., ROZSÍVALOVÁ Z. *Řízení jakosti*. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004. 75 s.
- [7] Agilent: E4980A Precision LCR metr – *Operation manual*, Yokogawa – Hewlett Packard LTD 2008, 549 s.
- [8] Agilent: 16451B Dielectric material test fixture – *Operation manual*, Yokogawa – Hewlett Packard LTD 2008, 149 s.
- [9] ROZSÍVALOVÁ, Z., VANĚK J., KŘIVÁK, P., *Materiály a technická dokumentace: Laboratorní cvičení*. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004. 83 s.
- [10] SCHUT.COM: *Katalog online*. Dostupný z WWW: http://www.schut.com/catalog/en/en_0096.html
- [11] MENTLÍK, V. a spol.. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [12] BROŽ P. *Analýza složené soustavy s různým podílem plniva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

5 Seznam zkratk a symbolů

\vec{D}	[C m ⁻²]	elektrická indukce
\vec{E}_0	[V m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E_e	[W m ⁻²]	ozáření
\vec{E}_{lok}	[V m ⁻¹]	intenzita lokálního elektrického pole
E_p	[V m ⁻¹]	elektrická pevnost
f	[Hz]	frekvence
f_0	[s ⁻¹]	vlastní frekvence změny polohy kolem rovnovážné polohy
m	[kg]	hmotnost
n, n_0	[m ⁻³]	koncentrace částic, koncentrace částic v jednotce objemu
P	[C m ⁻²]	polarizace
P_Z	[W]	ztrátový výkon
R	[m]	poloměr kruhového oblouku (Cole –Coleho diagram)
t	[s]	čas
T	[K]	termodynamická teplota
α	[F m ²]	polarizovatelnost
ε_0	[F m ⁻¹]	permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F m ⁻¹)
ε'	[-]	relativní permitivita (reálná složka komplexní permitivity)
ε''	[-]	ztrátové číslo (imaginární složka komplexní permitivity)
ε_∞	[-]	optická relativní permitivita
ε_s	[-]	statická relativní permitivita
ϑ	[°C]	teplota
κ	[-]	dielektrická susceptibilita.
λ	[m]	vlnová délka
$\vec{\mu}_i$	[C m]	indukovaný dipólový moment
π	[-]	Ludolfovo číslo ($\pi = 3,1415$)
ρ_v	[Ω m]	vnitřní rezistivita
ρ_p	[Ω]	povrchová rezistivita
τ	[s]	relaxační doba
ω	[rad]	úhlová frekvence
$tg \delta$	[-]	ztrátový činitel

6 Přílohy

6.1 Protokol o zkoušce dle ČSN IEC 250

Předmět zkoušky:

Vytlačované desky s označením „QUINN PS“ z krystalického polystyrenu od společnosti Quinn Plastics. Dodávány s ochrannou laminovanou polyetylenovou fólií v provedení čirém, antireflexním, opálovém nebo barevném.

Tab. 1 Tvar a rozměry zkušební vzorku

TVAR DODÁNÍ	TLOUŠŤKA [mm]	ROZMĚRY š x v [mm]	BARVA
Obdélníkový	1,5 – 4,75 *	210 x 296	Clear, Opal standard
TVAR VZORKU	Zkušební vzorek		
Čtvercový	2, 3, 6	70 x 74	Clear

* Pozn. Tloušťky 5 a 6 mm lze dodat za speciálních podmínek

Z dodané desky byly vzorky nařezány s ochrannou fólií na požadované rozměry pomocí plátku na železo. Po nařezání byla ochranná fólie z obou stran odstraněna (deska tloušťky 2 mm byla dodána již bez této fólie).

Místo provedení zkoušky:

VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, areál Údolní, budova U4 , učebna č. 102.

Měřící prostředí:

Tab. 2 Prostředí pro zkoušky, datum a čas zkoušky

DATUM MĚŘENÍ	ČAS MĚŘENÍ	TEPLOTA [°C]	VLHKOST [%]	TLAK [hPa]
7.4. Ø 38 mm	12 ³⁰ - 17 ⁰⁰	22,1	36,2	1026,5
28.4 Ø 5 mm	11 ⁰⁰ - 16 ⁰⁰	22,4	36,8	1027,8

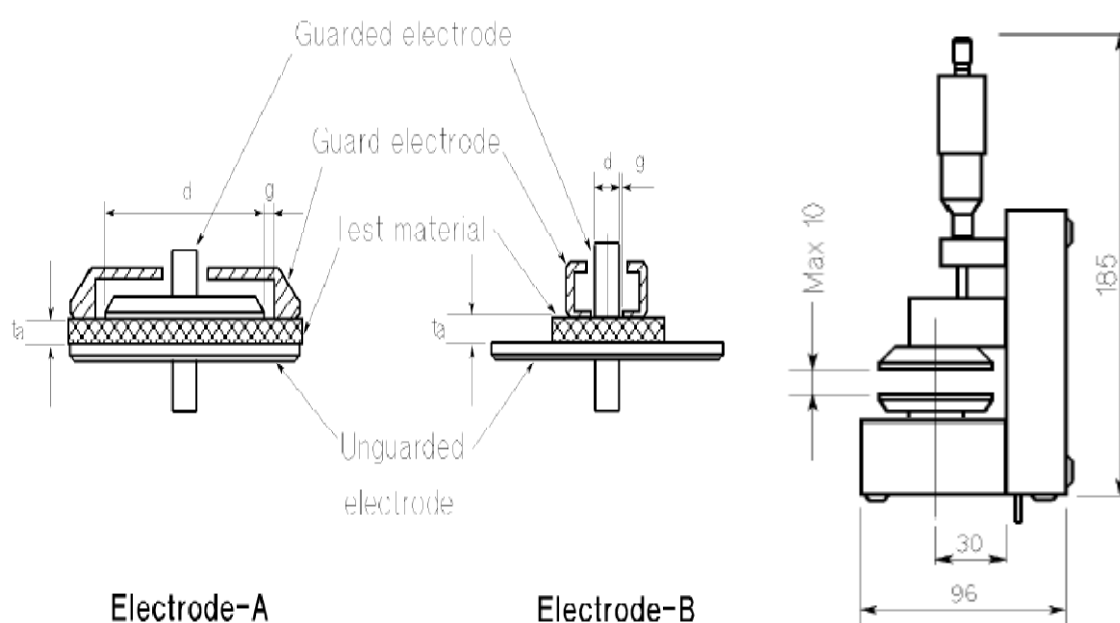
Tab. 3 Zvolené parametry pro měření

ROZSAH [Hz]	AC NAPĚTÍ [V]	DĚLKA KABELU [m]	MĚŘENÉ HODNOTY[-]	KOREKCE
20 – 2M *	1	1	$C_p, \text{tg } \delta$	OPEN, SHORT

* Pozn. Zvolené frekvenční pásmo pro vyhodnocování a grafické znázornění 1 kHz – 1MHz, z důvodu výskytu záporných hodnot v celém rozsahu měření

Zvolený elektrodotý systém:

Jedná se o třibodový rovinný elektrodotý systém Agilent 16451B. Tento systém je tvořen napěťovou a měřicí elektrodou kruhového tvaru a ochrannou elektrodou ve tvaru mezikruží. Použití ochranné elektrody snižuje vliv okrajové kapacity (tzn. $C_E = 0$) a zemnicí kapacity měřicí elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu na výsledky měření.



Obr. 1 Grafické znázornění použitého elektrodotého systému a měřicích elektrod [8]

Tab. 4 Rozměry elektrod [mm]

PARAMETRY	TYP A	TYP B
d_n	56	20
d_m	38	5
c	0,2	0,13
max. frekvence	30 MHz	30 MHz

Měřicí zařízení:

Veškeré hodnoty kapacity C_p a ztrátového činitele $tg \delta$ v závislosti na frekvenci byly měřeny přesným LCR metrem Agilent E4980A. Zařízení využívá k měření mostovou metodu s automatickým vyvažováním. Přístroj je propojen s osobním počítačem, na němž pomocí grafického ovládacího softwaru VEE Pro ver. 8.0 nastavíme požadované parametry pro měření. Po spuštění měření jsou veškeré naměřené hodnoty a data ukládány přímo do tabulkového procesoru Microsoft Excel.



Obr. 2 Měřicí pracoviště

Rozpis použitých přístrojů:

a) Měřicí přístroj

Precision LCR metr AGILENT E4980A 20Hz – 2 MHz VUT FEKT 18310
HIM 314003 (314004)

b) Elektrodový systém

Dielectric test fixture AGILENT 16451B – FG MY44100343 VUT FEKT 18310
ZP 314005 (HIM)

c) Přístroj pro měření teploty, tlaku a vlhkosti

Hygro- /Thermo- /Barometr Greisinger electronic GFTB 100 VUT FEKT 18310
OEHM 10000171441

d) Osobní počítač s prostředím Agilent VEE Pro ver. 8.0

e) Microsoft Office ver. 97 – 2003

Hodnoty aritmetických průměrů relativní permitivity ϵ_r a ztrátového činitele $tg \delta$:

Tab. 5 Ukázka pro elektrodu o \varnothing 38 mm, tloušťky $h = 2$ mm

f [Hz]	VZOREK 1			
	Korekce		Bez korekce	
	ϵ_r	$tg \delta$	ϵ_r	$tg \delta$
1000	2,514	0,00021	2,512	0,00032
1259	2,512	0,00030	2,511	0,00028
1585	2,511	0,00021	2,511	0,00022
1995	2,509	0,00016	2,510	0,00019
2512	2,511	0,00023	2,512	0,00016

Tab. 6 Ukázka pro elektrodu o \varnothing 5 mm, tloušťky $h = 2\text{mm}$

	VZOREK 1			
	Korekce		Bez korekce	
	f [Hz]	ϵ_r	tg δ	ϵ_r
1000	2,828	0,00190	2,818	0,00420
1259	2,828	0,00058	2,831	0,00261
1585	2,819	0,00407	2,810	0,00512
1995	2,820	0,00021	2,819	0,00019
2512	2,824	0,00073	2,822	0,00017

Pozn. Všechny vypočtené hodnoty aritmetických průměrů relativní permitivity ϵ_r a ztrátového činitele $tg \delta$ jsou k dispozici v tabulkovém procesoru Microsoft Excel na přiloženém digitálním médiu.