



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

ÚČINKY ELEKTRICKÉHO NAMÁHÁNÍ NA VLASTNOSTI ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

EFFECTS OF ELECTRICAL STRESS ON PROPERTIES OF ELECTRICAL INSULATING
MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JOSEF HANGYA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENKA ROZSÍVALOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Josef Hangya

ID: 83778

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Účinky elektrického namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor současného stavu v oblasti působení degradačních mechanismů na vlastnosti elektroizolačních materiálů. Podrobněji se zaměřte na účinky střídavého a pulzního elektrického namáhání. Prostudujte podstatu diagnostických metod používaných pro stanovení elektrických vlastností dielektrických materiálů ve stejnosměrném a střídavém elektrickém poli. Současně se zabývejte vlivem provozních činitelů a přístrojového nastavení na výslednou přesnost měřených veličin. Přizpůsobte laboratorní pracoviště, určené k dlouhodobým testům zrychleného stárnutí, s ohledem na působení střídavého a pulzního elektrického pole o různých intenzitách.

Zkušební vzorky vybraného elektroizolačního materiálu exponujte v prostředí o různých intenzitách elektrického pole a v průběhu experimentu sledujte aktuální stav materiálu metodou dielektrické relaxační spektroskopie. Získaná data matematicky a fyzikálně interpretujte se zřetelem na charakter, dobu a intenzitu elektrického namáhání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucí diplomové práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o vlivu stejnosměrného, střídavého a pulzního elektrického namáhání na vlastnosti zkoumaného elektroizolačního materiálu. Předmětem experimentu je vysokohustotní krystalický polystyren QUINN PS. Ke sledování namáhání je použita metoda dielektrické relaxační spektroskopie. Zkoumána jsou výsledná dielektrická spektra, která představují kmitočtové závislosti složek komplexní permitivity. Vzorky vybraného materiálu jsou vystaveny účinkům střídavého a pulzního elektrického namáhání o různých intenzitách elektrického pole. Ve stejnosměrném poli jsou pak sledovány absorpční charakteristiky a měrný vnitřní odpor vzorků.

Abstract:

Diploma thesis treat of effect of direct, alternate and pulse electrical stress on the properties surveyed electrical insulating material. Object of this experiment is crystalline high-density polystyrene QUINN PS. To monitor the stress is used the method of dielectric relaxation spectroscopy. Under examinations are the resultant dielectric spectra, which constitute the frequency dependencies of components of complex permittivity. Samples of the selected material are exposed to effects of alternate and pulse electrical stress on the different intensities of the electric field. In the direct field are then monitored absorption characteristics and specific volume resistance of the samples.

Klíčová slova:

Komplexní permitivita, kmitočtová závislost, dielektrické relaxační spektroskopie, pulzní namáhání, intenzita elektrického pole, absorpční charakteristiky, vysokohustotní krystalický polystyren.

Keywords:

Complex permittivity, frequency dependence, dielectric relaxation spectroscopy, pulse stress, intensity electric field, absorption characteristics, crystalline high-density polystyrene.

Bibliografická citace díla:

HANGYA, J. *Účinky elektrického namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 103 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 29. 5. 2014

.....

podpis autora

Poděkování:

Děkuji své vedoucí diplomové práce Ing. Zdence Rozsivalové a také Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za metodické vedení, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady, návrhy a připomínky při realizaci mé práce. Na závěr děkuji také rodičům za podporu a za to, že mi umožnili studovat a dojít takto daleko.

OBSAH

Úvod	8
1 Teoretická část	9
1.1 Vlastnosti dielektrik.....	9
1.1.1 Charakteristika dielektrik	9
1.1.2 Dielektrická polarizace	10
1.1.3 Polarizační mechanismy	11
1.1.4 Elektrická vodivost	15
1.1.5 Elektrická pevnost	16
1.2 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli	18
1.2.1 Komplexní permitivita.....	19
1.2.2 Dielektrické ztráty v pevných izolantech	24
1.3 Dielektrikum ve stejnosměrném elektrickém poli.....	30
1.3.1 Dielektrická absorpce	30
1.3.2 Vnitřní a povrchová rezistivita elektroizolačních materiálů.....	32
1.3.3 Dielektrické ztráty	34
1.4 Diagnostické metody zjišťování stavu izolačních materiálů	35
1.4.1 Stejnosměrné měřicí metody	35
1.4.2 Střídavé měřicí metody.....	38
1.5 Degradací mechanismy	42
1.5.1 Tepelné stárnutí	42
1.5.2 Elektrické stárnutí.....	44
1.5.3 Mechanické stárnutí.....	45
1.5.4 Kombinované stárnutí	46
1.5.5 Zrychlené stárnutí	46
1.6 Pulzní elektrické namáhání.....	47
1.6.1 Norma ČSN pro elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy	50
1.6.2 Současné studie v oblasti pulzního namáhání	52

2 Experimentální část	55
2.1 Zkušební vzorek	55
2.2 Měřicí zařízení.....	61
2.2.1 LCR metr Agilent E4980A.....	61
2.2.2 LCR metr Agilent E4285A.....	65
2.2.3 Vysokonapěťový pulzní zdroj	66
2.2.4 Vysokonapěťový zdroj	68
2.2.5 Regulovatelný zdroj Diametral.....	70
2.2.6 Tříelektrodový systém	70
2.2.7 Dvouelektrodový systém	73
2.2.8 Klimatická komora SteriCell	75
2.2.9 Měření rezistivity.....	75
2.2.10 Použité počítačové programy	78
2.3 Postup měření	78
2.4 Výsledky experimentu.....	80
2.4.1 Střídavé měření.....	83
2.4.2 Stejnosměrné měření	92
2.4.3 Náhradní matematická funkce	96
Závěr	98
Literatura	99
Seznam zkratek a symbolů	102

Úvod

Elektromagnetické pole působí na vše kolem nás. Současná doba se vyznačuje pokrokem ve všech směrech průmyslových odvětví a na dané materiály jsou kladeny stále větší nároky. S rychlým vývojem nových součástek, motorů, zařízení atd. je také potřeba stále více zlepšovat jejich vlastnosti. Důraz je kladen především na přesnost, spolehlivost a kvalitu s ohledem na cenu a maximální šetrnost k životnímu prostředí. Plnění uvedených požadavků s sebou nese odpovídajícím způsobem rostoucí nároky na informace a na způsoby jejich získávání. Dosáhnout zlepšení elektrických, mechanických, fyzických nebo i třeba chemických vlastností lze mnoha způsoby, ale jedním z nejzákladnějších je volba materiálu. Ale nejenom materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, ale i materiálu jejich různých součástí.

U elektrických zařízení je izolační materiál nejslabším článkem celého spolehlivostního řetězce. Materiály proto podléhají různým testům z mnoha hledisek, např. odolnosti proti vlivům prostředí, vlivům provozního namáhání a schopnosti takovým vlivům odolávat. Jinak řečeno, je nutné ověřit životnost daného materiálu a zjistit za jakou dobu zestárne natolik, že nebude schopen odolávat podmínkám, kterým bude vystaven a přestane plnit svou funkci.

K diagnostice vlastností materiálů je možno použít mnoha nedestruktivních i destruktivních metod. Jedna z nedestruktivních metod je dielektrická relaxační spektroskopie, kterou lze použít ke studiu různých materiálových soustav. Dielektrická relaxační spektroskopie 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.

Úkolem předložené diplomové práce je realizovat pracoviště pro elektrické namáhání a experimentálně prověřit základní dielektrické vlastnosti vzorků při působení střídavého a pulzního elektrického pole o různých intenzitách. Sledovány jsou především obě složky komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu. Ve stejnosměrném elektrickém poli jsou sledovány absorpční charakteristiky a vnitřní rezistivita vzorků.

V současné době probíhá mnoho výzkumů a experimentů zaměřených na podobná témata.

1 Teoretická část

1.1 Vlastnosti dielektrik

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 ve slabém elektrickém poli jím protéká malý, nikoliv však zanedbatelný, proud.

O dielektriku se hovoří ve vztahu s polarizovatelností částic a následně se schopností látky akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii. V ideálním dielektriku, které neobsahuje volné nosiče elektrického náboje, by se elektrické pole udrželo po neomezeně dlouhou dobu.

Každý izolant je současně dielektrikem, avšak ne všechna dielektrika jsou izolanty. Tuto skutečnost je schematicky znázorněna na obr. 1. K dielektrikům se řadí i četné 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]

Základními fyzikálními veličinami, které děje v dielektriku charakterizují, jsou:

- relativní permitivita ε' (-)
- ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ (-)
- vnitřní rezistivita ρ_V ($\Omega \text{ m}$)
- povrchová rezistivita ρ_P (Ω)
- elektrická vodivost E_P (V m^{-1})

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 $\operatorname{tg} \delta$, 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 $\vec{E}_{\text{lok}}$, kde platí

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

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

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

Další veličinou popisující fyzikální jevy v dielektriku je elektrická indukce $\vec{E}$, 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.

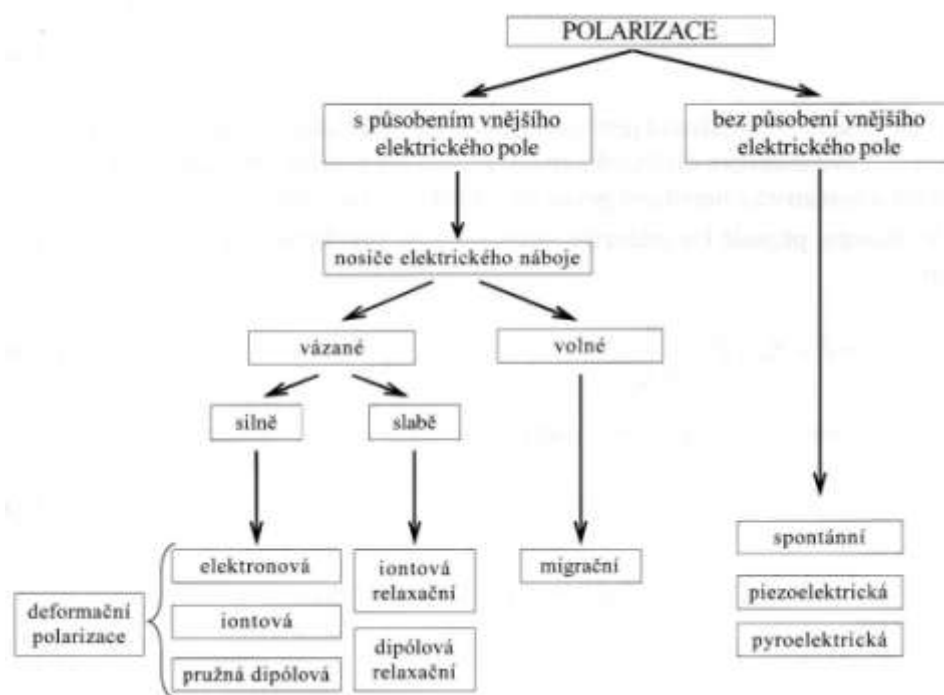
Vektor polarizace $\vec{P}$ je závislý na intenzitě elektrického pole $\vec{E}_0$, jak vyjadřuje následující vztah

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

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

1.1.3 Polarizační mechanismy

V dielektrických materiálech se vyskytuje několik typů polarizačních mechanismů. 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.



Obr. 2 Přehled polarizačních mechanismů [5]

Polarizace rychlé jsou jevy s rychlým průběhem. Spočívají v posuvu pružně vázaných nábojů v částicích dielektrika z jejich rovnovážných poloh, přičemž se posouvají stejná množství kladných a záporných nábojů v opačných směrech. Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání, probíhají prakticky okamžitě, pružně a beze ztrát energie. Tyto polarizace jsou tepelně nezávislé v celém rozsahu frekvencí používaných v elektrotechnice.

- *Polarizace elektronová* se vyskytuje u všech dielektrik, probíhá beze ztrát a nezávisí na teplotě.
- *Polarizace iontová* se vyskytuje jen u iontových krystalů, probíhá beze ztrát a je závislá na teplotě.
- *Polarizace pružně vázaných dipólových momentů* se vyskytuje v pevných látkách, v nichž jsou molekuly vázány pružnými vazbami jen tak silnými, že dochází pouze k malým posuvům. Je teplotně nezávislá a bezetrátová.

Polarizace pomalé jsou jevy s pomalým průběhem. Závisí na teplotě i na tepelném pohybu částic, jehož energie je příčinou přemístění částic z jejich rovnovážných poloh, přičemž elektrické pole toto přemístění jen orientuje do svého směru. Proto se často označují jako polarizace tepelné nebo teplotně závislé. Jsou vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku, které způsobují jeho ohřev.

- *Polarizace dipólová* se vyskytuje u polárních látek.
- *Polarizace iontová – relaxační* se vyskytuje v iontových látkách.

Polarizace zvláštní

- *Polarizace mezivrstevová* se objevuje u látek s makroskopickými nehomogenitami (laminát, pórovité a pěnové látky). Nejpomalejší polarizační mechanismus, který je provázen ztrátami a je závislý na teplotě a na frekvenci.
- *Polarizace samovolná* se vyskytuje u látek s doménovou strukturou, je ztrátová, závislá na frekvenci, intenzitě elektrického pole a je silně závislá na teplotě.
- *Polarizace trvalá* probíhá u některých látek polárních s malou elektrickou vodivostí.
- *Polarizace rezonanční* se vyskytuje u všech dielektrik a projevuje se ve viditelném spektru frekvencí [13].

Deformační polarizace

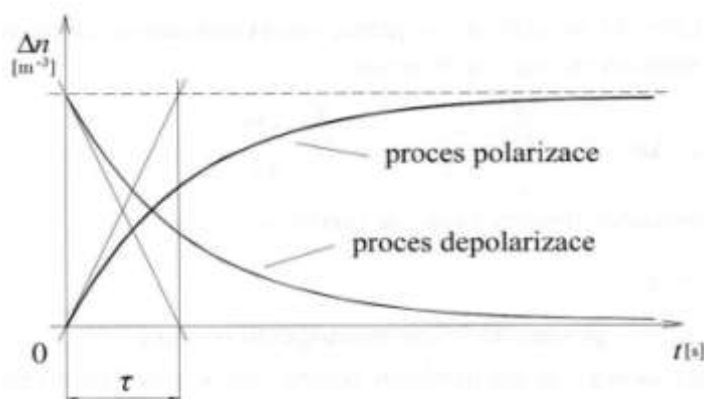
Nosičem elektrického náboje při těchto polarizacích je iont, elektron nebo i stálý dipól (přítomný přímo ve struktuře látky díky její struktuře a stavbě). Nosič náboje je pevně držen v atomu, molekule, nebo krystalu. Vnější elektrické pole jej může pouze z jeho rovnovážné polohy na zcela minimální vzdálenost 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].

Relaxační polarizace

Relaxační polarizace se výrazně liší od deformační dobou průběhu, která je značně delší, ale i formou. *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 dotýcných 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 změníme 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 nepolarizovaného 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 přechodovým 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 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 jinou relativní permitivitu a konduktivitu. 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 je spojena se ztrátou energie.

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

1.1.4 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost popisuje schopnost látky dobře vést elektrický proud. Čím větší je vodivost, tím větší elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí. Z pohledu ideálního dielektrika se jedná o nežádoucí vlastnost. Elektrickou vodivost lze rozdělit podle druhu nosičů náboje na iontovou, elektronovou a elektroforetickou. Dále lze elektrickou vodivost dielektrických látek rozdělit podle povahy na vnitřní a povrchovou. Vnitřní konduktivita je dána vztahem

$$\gamma_V = n q \mu \quad (5)$$

kde n je koncentrace nosičů elektrického náboje, q je náboj nosiče elektrického náboje a μ je driftová pohyblivost.

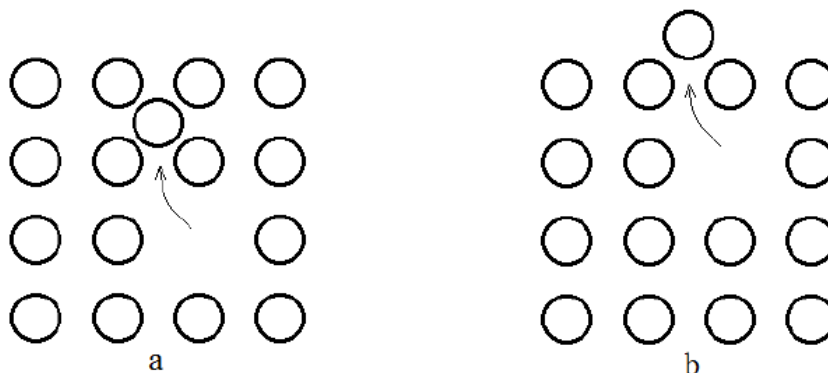
Podle elektrické vodivosti rozdělujeme látky do tří následujících skupin:

- **iontové krystalické látky**
- **anorganické amorfnní látky**
- **organické amorfnní látky**

Strukturu **iontových krystalických látek** tvoří kladné a záporné ionty nacházející se v uzlech mřížky. V ideální mřížce se ionty přirozeně nemohou pohybovat, proto je vodivost uskutečnitelná postupnou výměnou kladných a záporných iontů. Tento děj je energeticky velmi náročný. Reálné krystaly však vykazují určitou měřitelnou elektrickou vodivost, proto existují ještě jiné možnosti pohybu iontů krystalem. Ionty občas při svých tepelných kmitech získávají dostatečnou energii k tomu, aby opustily své místo v uzlu mřížky a přeskočily do tzv. **intersticiální polohy** (meziuzlového prostoru). Vznikne tak vždy jedna **vakance** (volné místo ve struktuře) a jeden intersticiální iont (meziuzlová poloha). Této poruše krystalové mřížky se říká Frenkelova (obr. 4a).

V případě, kdy se v mřížce krystalu vyskytuje stejný počet volných míst po kladných a záporných iontech, které opustily svá místa v uzlech mřížky a usadily se na povrchu krystalu, kde vytvoří nové vrstvy krystalu. Takto vzniká Schottkyho porucha (obr. 4b).

Poruchy krystalové mřížky způsobené přítomností cizích atomů se nazývají sekundární poruchy. Tyto atomy mají jiný iontový poloměr, nebo jinou valenci než ionty základní mřížky. To vede k porušení pravidelnosti stavby základní mřížky [5].



Obr. 4 Frenkelova (a) a Schottkyho (b) porucha

Představiteli **anorganických amorfních látek** jsou především různé druhy skel. Elektrická vodivost jednotlivých druhů skel se velmi liší, při pokojové teplotě je v rozsahu asi $10^{-3} \div 10^{-17} \text{ S m}^{-1}$.

Mezi **organické amorfní látky** patří především syntetické makromolekulární látky. Jedná se o velmi rozsáhlý a rozmanitý soubor materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Běžně používané polymerní materiály (polyetylén, polystyrén, polytetrafluorethylén, polyethylentereftalát, polymethylmetakrylát, polyvinylchlorid) mají elektrickou vodivost menší než $10^{-17} \text{ S m}^{-1}$ [5].

1.1.5 Elektrická pevnost

Elektrickou pevností se rozumí vzájemně od sebe elektricky oddělit místa s různým elektrickým potenciálem. Při napětí vyšším, než je určitá kritická hodnota dochází k jevům, při kterých roste počet volných nosičů náboje i jejich pohyblivost a izolant přestává plnit svou funkci. Průraz izolantu představuje vždy nekontrolovatelné zvýšení elektrické vodivosti, které může být dočasného nebo trvalého charakteru. Napětí, při němž k tomuto jevu dojde, nazýváme průrazné a definujeme pak elektrickou pevnost izolantů jako podíl k tloušťce materiálu v místě průrazu

$$E_P = \frac{U_P}{d}, \quad (6)$$

kde E_P je elektrická pevnost, U_P je průrazné napětí a d je tloušťka materiálu.

V případě homogenního elektrického pole představuje elektrická pevnost intenzitu elektrického pole, při níž dojde k průrazu. V nehomogenních polích je situace značně složitější. Srovnání různých materiálů můžeme provést pouze tehdy, když byly výsledky získány za stejných podmínek. Tyto podmínky se zajišťují velmi obtížně, neboť elektrická pevnost je silně závislá na řadě činitelů, jimiž jsou tloušťka, struktura, homogenita materiálu, obsah nečistot, vlhkost, tvar elektrického pole a jeho frekvence, teplota izolantu a jeho okolí, soubor okolností předcházejících průraz [5].

Elektrická pevnost izolanů závisí také na druhu a délce působení expozičního napětí. Mluvíme pak o:

- střídavé elektrické pevnosti
- impulzní elektrické pevnosti
- stejnosměrné elektrické pevnosti

Průraz dielektrik

Uvnitř dielektrika se vytvoří vodivé spojení, kterým může procházet elektrický proud. Působením silného elektrického pole může dojít k průrazu dielektrika. Po dráze elektrického proudu se díky velké elektrické síle vytrhují elektrony z atomů nebo molekul. Může dojít k trvalému nebo k dočasnému poškození dielektrika.

Velikost maximálního elektrického pole, při němž ještě nedojde k průrazu, se nazývá dielektrická pevnost a závisí na velikosti ionizační práce, potřebné k ionizaci (uvolnění elektronu z atomu). Vznik průrazu charakterizuje průrazné napětí, které udává nejmenší velikost napětí, které způsobí průraz při dané tloušťce materiálu.

Z hlediska charakteru dějů a mechanismů probíhajících v pevných látkách při elektrickém namáhání, které končí jejich průrazem, obecně rozlišujeme tři způsoby průrazu dielektrika:

Čistě elektrický průraz – dojde k němu, když nemůže dojít k postupnému ohřevu dielektrika a tím k rozvoji procesu stárnutí. Na základě existujících informací a experimentálních výsledků převládá názor, že při čistě elektrickém průrazu pevných dielektrik jsou rozhodující volné elektrony. Velikost průrazného napětí nezávisí na teplotě ani na délce působení přiloženého pole. Energie elektrického pole způsobí okamžitou destrukci v nejslabším místě namáhaného objektu a je ovlivňována homogenitou elektrického pole, chemickým složením a strukturou dielektrika. Při malé koncentraci volných elektronů je předpoklad vzájemných srážek daleko menší, než srážek elektronů se strukturou izolantu. V důsledku prudkého nárůstu počtu volných elektronů dojde k průrazu a to v okamžiku, kdy intenzita působícího elektrického pole dosáhne úrovně elektrické pevnosti. Při velké koncentraci je pak rozhodující výměna energie mezi samotnými elektrony při jejich vzájemných srážkách, kde volné elektrony jsou urychlovány elektrickým polem a tím se sráží s jinými elektrony [5].

Tepelný průraz – jedná se o případ, kdy v dielektriku vznikne tepelně elektrická nerovnováha v důsledku dielektrických ztrát. Teplota dielektrika vzrůstá, jestliže množství tepla, které se v dielektriku vyvíjí, převyšuje teplo odváděné do okolí. Růst teploty může vést k ustavení rovnováhy mezi vznikajícím a odváděným teplem nebo naopak k jejímu neustálému zvyšování až k průrazu.

Elektrochemický průraz – projevuje se tehdy, působí-li na izolant elektrické pole po dlouhou dobu. V izolantu se pak zhoršují jeho vlastnosti, a to díky elektrochemickým procesům, v konečném důsledku pak výrazně snižují jeho elektrickou pevnost [5].

1.2 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Vlivem střídavého elektrického pole se v dielektriku pohybují volné a vázané náboje. Energie elektrického pole se pak přeměňuje v kinetickou nebo potenciální energii, kde díky srážkám nosičů náboje s okolními neutrálními částicemi se část této energie přemění v teplo. Přiložíme-li na dielektrikum střídavé elektrické pole s určitou frekvencí, budou se náboje snažit sledovat svým posunem vnější pole tak, aby zaujaly stav s minimální energií. Polarizace ale sleduje elektrické pole s určitým zpožděním a tak se bude opožďovat i časový průběh napětí za průběhem proudu. Takto vzniklý fázový posun proudových hustot v dielektriku umožňuje použití komplexních čísel [14].

1.2.1 Komplexní permitivita

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

$$\vec{E}_{(t)} = \vec{E} \cos \omega t, \quad (7)$$

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

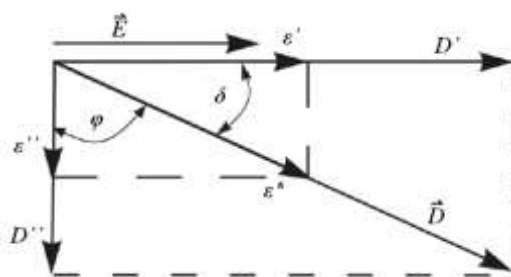
Činitelem úměrnosti mezi veličinami $\vec{E}$ a $\vec{D}$ *komplexní permitivita*, kterou lze vyjádřit vztahem

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (8)$$

Reálná složka komplexní permitivity ε' je *vlastní relativní permitivita*, která je mírou kapacitního charakteru dielektrika. Ve střídavém poli má stejný význam jako ε_s v poli statickém. *Imaginární část* ε'' , nazývaná 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 intenzity elektrického pole $\vec{E}$ je dáno vztahem

$$\vec{D}_{(t)} = \vec{D} \cos (\omega t - \delta) \quad (9)$$



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

Z vektorového diagramu na obr. 5 vyplývá pro ztrátové číslo vztah

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta, \quad (10)$$

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

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j \omega \tau} \quad (11)$$

kde ε_s je statická relativní permitivita ($f \rightarrow 0$), ε_∞ je optická relativní permitivita ($f \rightarrow \infty$), τ je relaxační doba, závislá na teplotě a nezávislá na čase.

Po rozložení vztahu (11) na reálnou a imaginární část obdržíme pro ε' a ε'' tyto vztahy

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (12)$$

a

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (13)$$

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

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

a

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

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

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'' = 0 \quad (16)$$

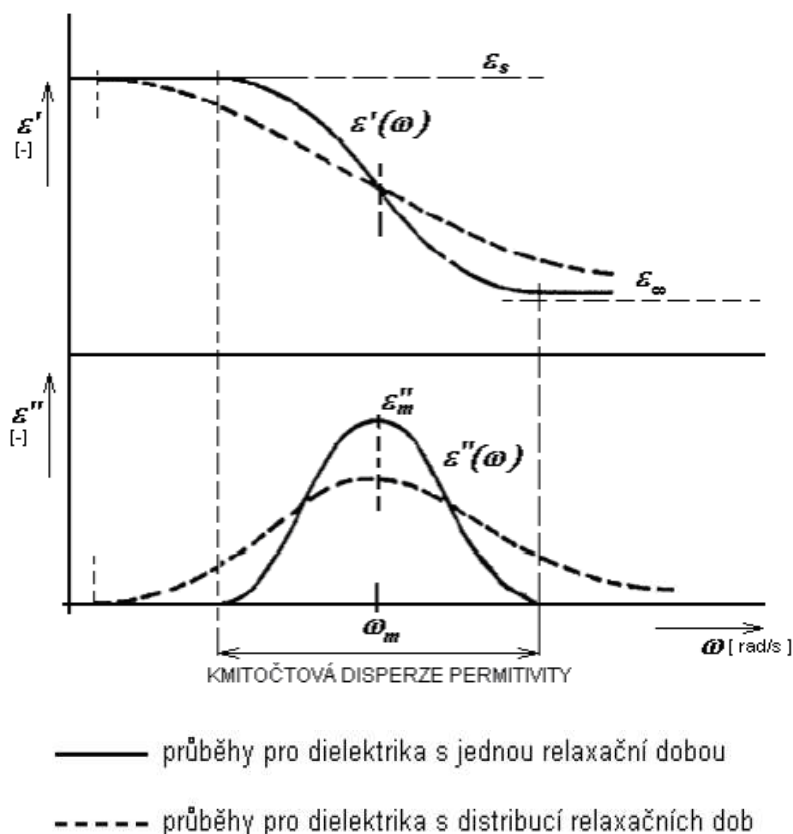
a

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon'' = 0 \quad (17)$$

Ze vztahů (12) a (13) lze získat výraz pro ztrátový činitel, který respektuje pouze polarizační ztráty

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{\varepsilon_S + \varepsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \quad (18)$$

Vynesením grafických závislostí $\varepsilon' = f(\omega)$ a $\varepsilon'' = f(\omega)$ z výše uvedených rovnic, získáme průběhy (plnou čarou), uvedené na obr. 6.



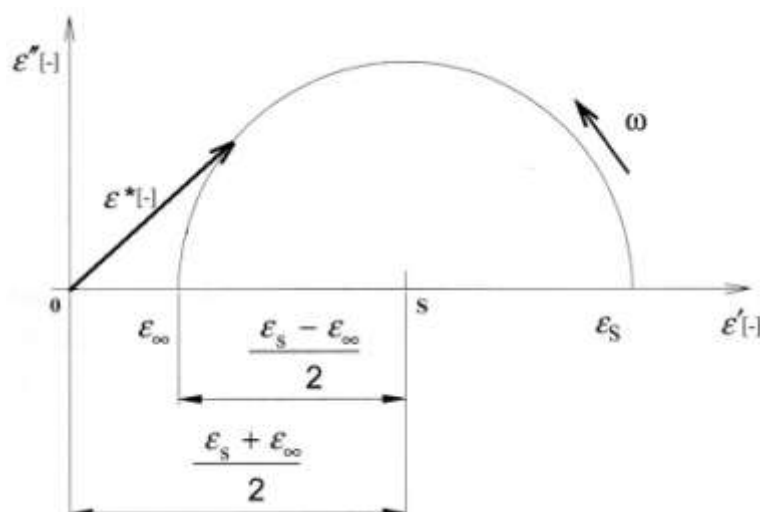
Obr. 6 Závislost složek ε' a ε'' komplexní permitivity na kruhovém kmitočtu ω ($T = \text{konst.}$) [2]

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 kondenzátor ideální. Oblast, ve které relativní permitivita ε' klesá s frekvencí, se nazývá oblastí dielektrické disperze.

Eliminací výrazu $\omega \tau$ v rovnicích (12) a (13) pro vzájemný vztah reálné a imaginární složky komplexní permitivity lze získat rovnici kružnice ve tvaru

$$\left(\varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 + \varepsilon''^2 = \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}\right)^2 \quad (19)$$

Grafickému znázornění rovnice (19) se říká **Coleho-Coleho** kruhový diagram. Jeho základní tvar je zobrazen na obr. 7. 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 Debyeho mechanismů s různými relaxačními dobami.



Obr. 7 Coleho-Coleho kruhový diagram pro dielektrikum s jednou relaxační dobou [5]

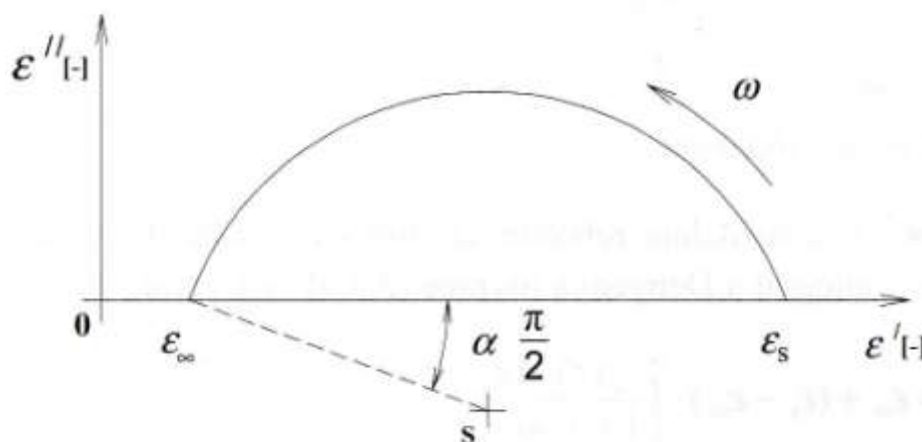
Zploštění obou křivek se vysvětluje tím, že Debyeho průběh $\varepsilon^* = f(\omega)$ podle vztahu (11) platí jen tehdy, jestliže se všechny dipólové molekuly chovají stejně a přitom na sebe vzájemně nepůsobí a existuje tak jen jeden typ relaxačního mechanismu s jednou relaxační dobou τ . U složitějších látek, které obsahují současně několik typů dipólových molekul, bude mít každý typ molekul svou vlastní relaxační dobu.

Zploštělým křivkám odpovídá upravený Debyeho vztah ve tvaru

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + (j \omega \tau_1)^{1-\alpha}}, \quad (20)$$

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' (obr. 8). Pro $\alpha = 0$ přejde vztah (20) do tvaru (11) klasického Debyeho průběhu.



Obr. 8 Cole-Cole diagram s jedním distribučním parametrem [5]

Havriliak a Negami navrhli další úpravu vztahu pro vyjádření komplexní relativní permitivity (vyhovující i látkám se složitou strukturou)

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{(1 + (j \omega \tau)^{1-\alpha})^\beta}, \quad (21)$$

kde pro parametr charakterizující šířku relaxačního spektra α platí $0 < \alpha < 1$ a pro parametr charakterizující asymetrii disperzní křivky β platí $0 < \beta < 1$.



Obr. 9 Havriliak-Negamiho diagram se dvěma distribučními parametry [1]

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.

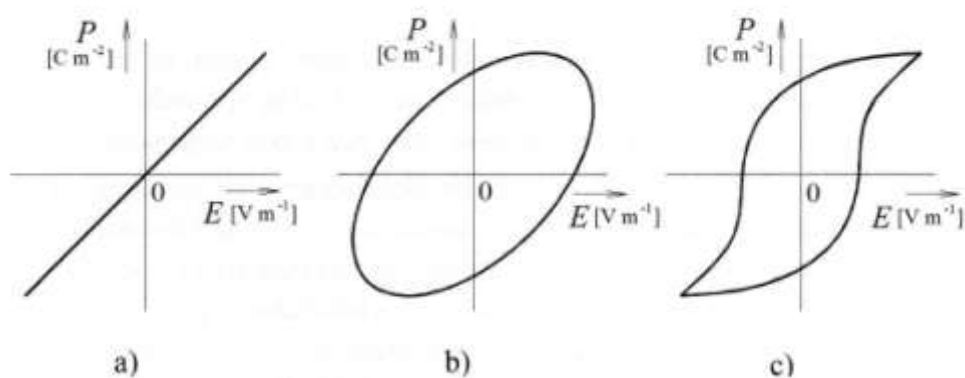
Obecně lze říci, že pro použití izolantů je rozhodující, kolik elektrické energie se díky dějům odehrávajícím se v jejich struktuře po zatížení elektrickým polem změní v jejich objemu za jednotku času v jinou, většinou, z hlediska elektroizolační techniky nežádoucí, tepelnou energii. Tuto změnu energie 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 vede k dalšímu nárůstu ztrát a tím opětovnému následnému nárůstu teploty. Tento nežádoucí proces může posléze končit tepelným průrazem, tedy 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 tedy na chemickém složení, obsahu nečistot a příměsí, na vnitřní stavbě a skupenství a na vnějších fyzikálních podmínkách. *Příčinou dielektrických ztrát* jsou pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje obsažených v materiálu. Se ztrátou energie jsou 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 přemostňující pouze určitou část vzdálenosti mezi

elektrodami a mající degradační účinky na prostředí, v němž vznikají. Pak mluvíme o ionizačních ztrátách. Dielektrické ztráty zahrnují *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, *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 opožďování 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, závislé na teplotě dielektrika a frekvenci působícího elektrického pole.

Dalším polarizačním dějem, který je provázený ztrátou energie je *migrační* (mezivrstvá) polarizace. Zde dochází k 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.

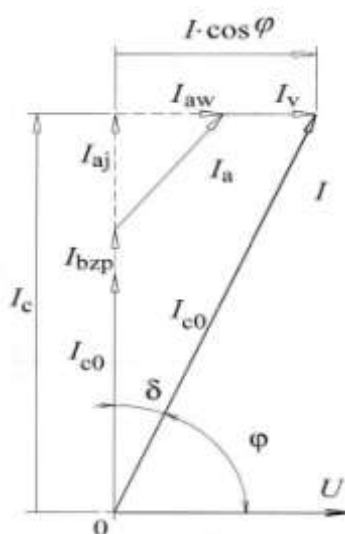
Vyneseme-li závislost velikosti vektoru polarizace na intenzitě působícího střídavého elektrického pole v průběhu jedné periody (obr. 10), získáme dobrý přehled o tom, jak jednotlivé polarizace přispívají k celkovým dielektrickým ztrátám. Jestliže se v materiálu vyskytují pouze pružné polarizace, polarizační ztráty nevznikají a závislost $P = f(E)$ je lineární (obr. 10a). 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. 10b). Obr. 10c platí pro ferroelektrické látky – závislost $P = f(E)$ má tvar hysterezní smyčky [5].



Obr. 10 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 dielektrikum působí střídavé elektrické pole, uplatní se kromě vodivostních i ztráty vyvolané polarizacemi a mnohdy i ztráty ionizační. Platí, že ztráty ve střídavém elektrickém poli bývají mnohem větší než v poli stejnosměrném. V praxi ztráty daného dielektrika nejčastěji vyjadřujeme právě na základě velikosti tangenty ztrátového úhlu δ a mluvíme pak o *ztrátovém činiteli* $\tan \delta$. Dielektrické ztráty můžeme vyjádřit pomocí *ztrátového výkonu* P_Z , případně pomocí *měrných dielektrických ztrát* p_Z , tzn. ztrátového výkonu vztaženého 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 fázorový diagram na obr. 11. 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 pomalým ztrátovým 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 fázorového 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].



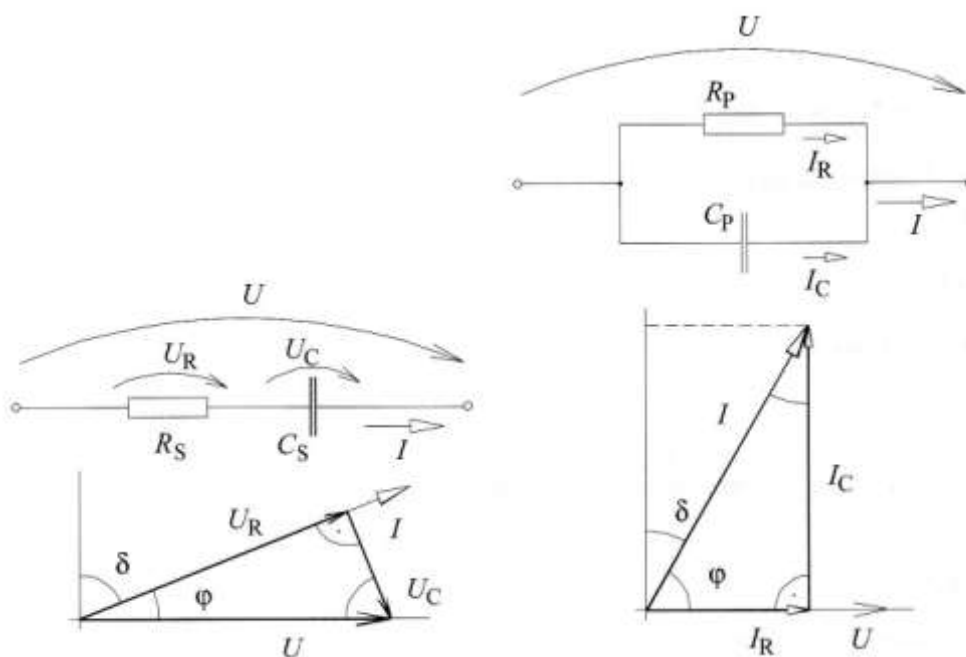
Obr. 11 Fázorový diagram reálného dielektrika [5]

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

$$P_{Z_{stř}} = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (22)$$

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. 12 zachycuje sériový a paralelní náhradní obvod s odpovídajícími fázorovými diagramy [5].



Obr. 12 Sériový a paralelní náhradní obvod [5]

Sériové zapojení:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s \quad (23)$$

$$P_Z = \frac{\omega C_s U^2 \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (24)$$

Paralelní zapojení:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad (25)$$

$$P_Z = \omega C_P U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (26)$$

Pro prvky sériového a paralelního náhradního schématu potom lze psát:

$$C_P = \frac{C_S}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad a \quad R_P = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta} \cdot R_S \quad (27)$$

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:

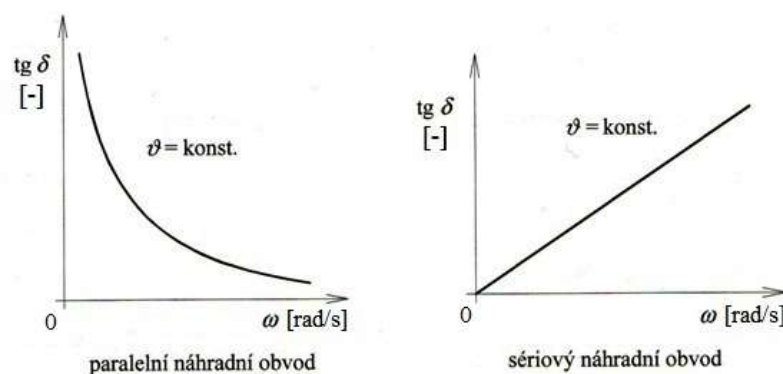
$$C_P = C_S = C \quad (28)$$

$$R_P \gg R_S \quad (29)$$

$$P_Z = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (30)$$

Pro malé hodnoty $\operatorname{tg} \delta$ (nejčastější případ) se obě náhradní schémata liší jen nepatrně. S ohledem na to, že $R_P \gg R_S$, se však kapacita kondenzátoru určuje z paralelního náhradního obvodu. 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 z hlediska měření permitivity [5].

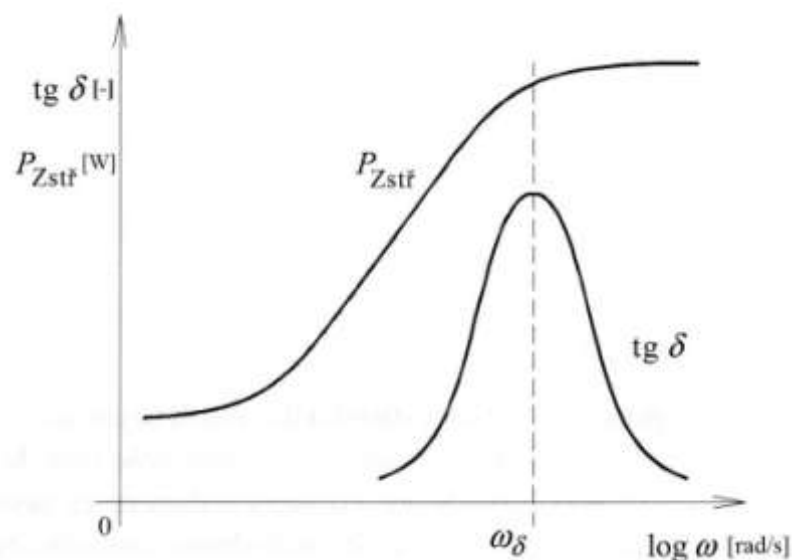
Ztrátový činitel v *paralelním náhradním obvodu* klesá s rostoucí frekvencí (při konstantní teplotě) podle hyperboly. V případě *sériového náhradního obvodu* tedy při stálé teplotě ztrátový činitel roste lineárně se vzrůstající frekvencí (obr. 13).



Obr. 13 Závislost $\text{tg } \delta$ v náhradních obvodech na frekvenci [5]

Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ se v praxi používá pro rychlé posouzení kvality daného izolantu. Dobrý je materiál, jehož $\text{tg } \delta$ je menší než 10^{-3} , z elektroizolačního hlediska špatný s $\text{tg } \delta$ 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 $\text{tg } \delta$ na napětí, frekvenci a teplotě. Jedná se o následující charakteristiky:

- **ztrátová charakteristika** – $\text{tg } \delta = f(U)$ – 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** – $\text{tg } \delta = f(f)$ – závislost ztrátového činitele na frekvenci při daném určitém napětí a teplotě. Na obr. 14 je uvedena závislost ztrátového výkonu $P_{\text{Zstř}}$ a $\text{tg } \delta$ 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 extrémy. Oblastem těchto frekvencí se při aplikaci daného izolantu vyhýbáme.



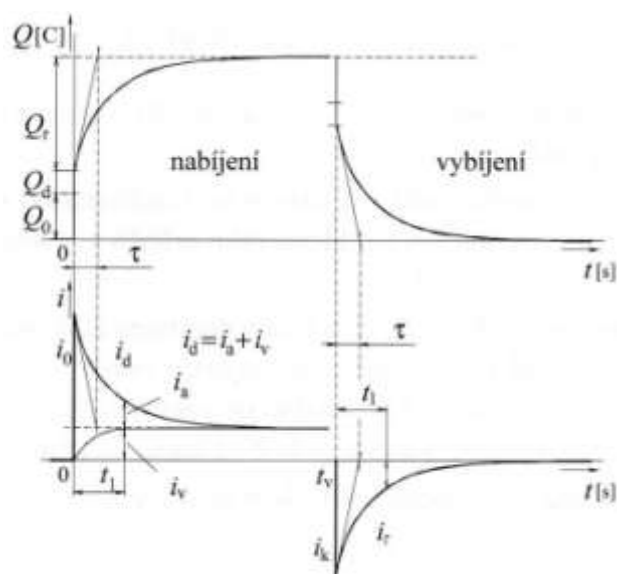
Obr. 14 Frekvenční závislost ztrátového činitele a ztrátového výkonu [5]

- **teplotní charakteristika** – $\text{tg } \delta = f(\vartheta)$ – 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 [5].

1.3 Dielektrikum ve stejnosměrném elektrickém poli

1.3.1 Dielektrická absorpce

Jsou to složité nestacionární děje probíhající v technickém dielektriku, vloženém mezi elektrody, po jeho připojení ke zdroji stejnosměrného napětí. Dielektrikum není schopno sledovat skokovou změnu napětí, tzn. že se nenabije okamžitě, ale až po určité době. Stejně tak se i s určitým zpožděním bude vybíjet. Příčinou těchto zpoždění (a tedy absorpce) je dielektrická relaxace – **zpomalená odezva dielektrika na působení elektrického pole** – způsobená pomalými polarizacemi.



Obr. 15 časový průběh náboje a proudu při nabíjení a vybíjení kondenzátoru [5]

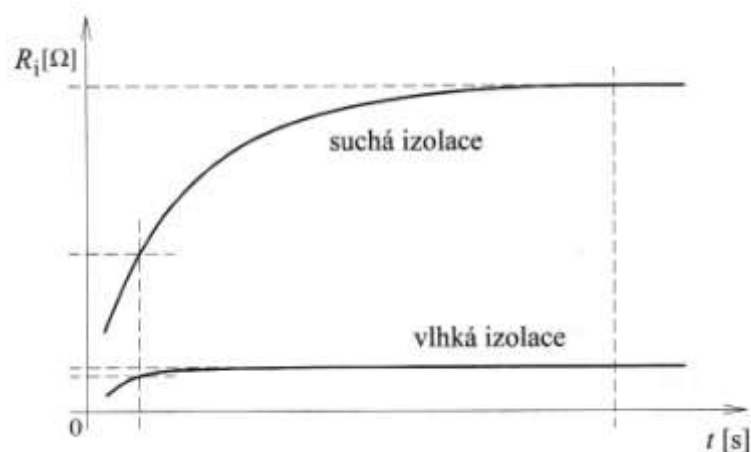
kde Q_0 je počáteční okamžitý náboj, Q_d náboj vyvolaný vlivem deformačních polarizací, Q_r náboj vyvolaný vlivem relaxačních polarizací, i_0 je nabíjecí proud, i_d je dobíjecí proud, i_a je absorpční proud, i_v je vodivostní proud, i_k je vybíjecí proud, i_r je resorpční proud.

Příčiny vzniku absorpčního proudu lze rozdělit do tří skupin:

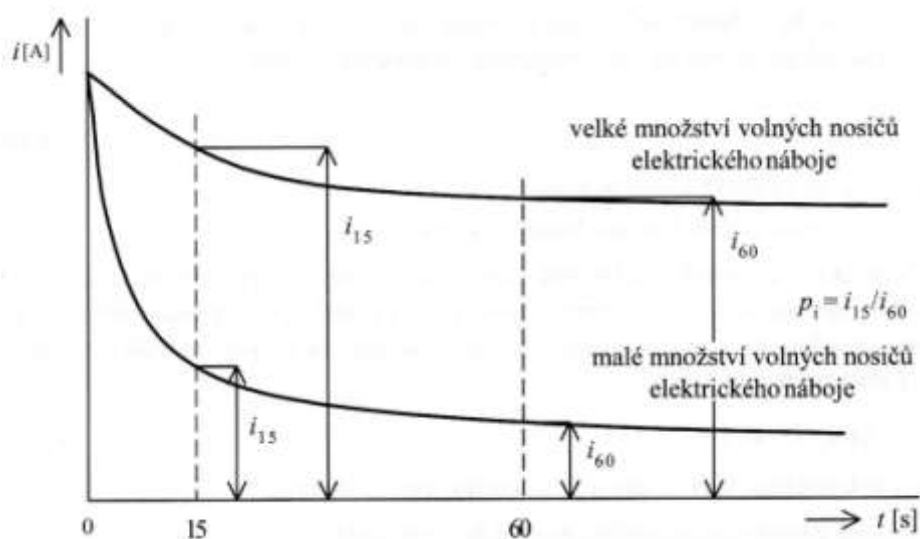
- polarizace silně vázaných nosičů náboje v elektrickém poli (relaxační polarizace)
- hromadění volných nosičů náboje na rozhraních nehomogenit
- vznik prostorových nábojů v blízkosti elektrod

Absorpční proud s časem postupně klesá k nule a rychlost poklesu je dána strukturou a stavem dané látky. Časová závislost absorpčního proudu je velmi dobře využitelná pro zjištění stavu izolace elektrických zařízení. Změny stavu a struktury dielektrik s sebou nesou i změny časového průběhu absorpčního proudu a strmost tohoto průběhu je charakteristická pro aktuální stav daného dielektrika.

U materiálů, které jsou v dobrém izolačním stavu, suché a nepoškozené, je vodivostní proud i_v mnohem menší než převládající absorpční proud i_a a polarizační index p_i je u nich výrazně větší než jedna (u kvalitních izolantů dosahuje hodnot 3 – 6). Naopak u vlhké nebo jinak vadné izolace je vodivostní proud i_v poměrně velký, čímž se hodnota polarizačního indexu p_i blíží jedné [5].



Obr. 16 časová závislost izolačního odporu suché a vlhké izolace [5]



Obr. 17 Průběh absorpčních charakteristik pro suchý a navlhlý materiál [5]

1.3.2 Vnitřní a povrchová rezistivita elektroizolačních materiálů

Způsoby měření a metodami pro měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů se zabývá norma ČSN IEC 93 „Metody měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů“ a ČSN IEC 167 „Zkušební metody na stanovení izolačního odporu tuhých elektroizolačních materiálů“.

Základní pojmy:

- **Zdroje napětí** pro tato měření musí být dostatečně stabilní. Při změně napětí musí být změna proudu zdroje proti měřenému proudu zanedbatelná. Napěťové hladiny jsou doporučeny: 100, 250, 500, 1 000, 2 500, 5 000, 10 000, 15 000 V. Nejčastěji se používá 100, 500, 1 000 V. Pokud měřený odpor závisí na polaritě napětí, je nutné to uvést. Výsledkem je pak geometrický průměr (aritmetický průměr logaritmických exponentů) obou hodnot odporů. Závisí-li odpor zkoumaného materiálu na napětí, je nutné zkušební napětí uvést.
- **Izolační odpor** zkoušeného materiálu, vloženého mezi elektrody, je poměr stejnosměrného napětí přivedeného na elektrody a celkového proudu mezi nimi v daném čase po připojení napětí. Závisí na vnitřním a povrchovém odporu materiálu. Pokud není stanoveno jinak, určuje se po jedné minutě od přiložení napětí na elektrody.
- **Vnitřní odpor** je poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi elektrody, které jsou umístěny na dvou protilehlých stranách zkušební tělesa a ustáleného proudu mezi elektrodami, vyjímaje proud po povrchu zkušební tělesa se zanedbáním polarizačních jevů v oblasti elektrod.
- **Povrchový odpor** je poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi elektrodami na povrchu zkušební vzorku a proudu mezi elektrodami v daném čase přiložení napětí při zanedbáním polarizačních jevů v oblasti elektrod. Je pochopitelné, že měříme proud tekoucí po povrchu tělesa, který je ovlivňován absorbovanou vlhkostí a příměsemi včetně nečistot a zahrnuje i složku tekoucí vnitřkem tělesa.
- **Vnitřní rezistivita** je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř elektroizolačního materiálu. Je to vnitřní odpor redukovaný na objemovou jednotku. Jednotkou je $\Omega \text{ m}$, používá se též $\Omega \text{ cm}$.

$$\rho_V = R_X \cdot \frac{S_{ef}}{h}, \quad (31)$$

kde ρ_V je vnitřní rezistivita, R_X je vnitřní odpor, S_{ef} je efektivní plocha měrné elektrody a h je průměrná tloušťka zkušební tělesa.

- **Povrchová rezistivita** je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty v povrchové vrstvě elektroizolačního materiálu. Jednotkou je Ω .

$$\rho_p = R_X \cdot \frac{I_{ef}}{g}, \quad (32)$$

kde ρ_p je povrchová rezistivita, R_x je povrchový odpor, o_{ef} je efektivní obvod ochranné elektrody pro příslušné elektrodové uspořádání a g je vzdálenost mezi elektrodami [19].

Vzorce pro výpočet efektivní plochy S_{ef} a efektivního obvodu o_{ef} jsou pro charakteristická uspořádání uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Efektivní plochy a obvody pro výpočet rezistivit [5]

Druhy elektrod	vnitřní – plocha S_{ef}	povrchová – obvod o_{ef}
kruhové elektrody	$\frac{\pi (d_1 + g)^2}{4}$	$\pi (d_1 + g)$
pravoúhlé elektrody	$(a + g) (b + g)$	$2 (a + b + 2 g)$
čtvercové elektrody	$(a + g)^2$	$4 (a + g)$
trubkové elektrody	$\pi (d_0 - h) (l_1 + g)$	$2 \pi d_0$

1.3.3 Dielektrické ztráty

Pro vznik **dielektrických ztrát** platí, že existují při stejnosměrném i střídavém napětí, a to při jakémkoli tvaru napěťové křivky. V případě **stejnosměrného napětí** je rozhodující vodivostní proud, jehož průchodem dielektrikem vznikají Jouleovy ztráty. Jejich velikost je úměrná velikosti zmíněného procházejícího proudu. Závisí tedy i na odporu izolantu a pro velikost ztraceného výkonu můžeme napsat:

$$P_{Zss} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (33)$$

kde R_i je izolační odpor dielektrika, U je napětí přiložené na vzorek a I je ustálená hodnota proudu procházejícího dielektrikem.

K posouzení izolačních materiálů z hlediska dielektrických ztrát lze použít kromě ztrátového činitele a ztrátového výkonu i tzv. **měrné dielektrické ztráty** – celkové ztráty vztažené na jednotku objemu. Ve stejnosměrném elektrickém poli budou měrné dielektrické ztráty v deskovém kondenzátoru s tloušťkou dielektrika h a plochou elektrod S_{ef} dány:

$$P_{ZSS} = \frac{P_{ZSS}}{V} = \frac{U^2}{R_V \cdot h \cdot S_{\text{ef}}} = \frac{E^2 \cdot d^2}{\rho_V \cdot \frac{h}{S_{\text{ef}}} \cdot h \cdot S_{\text{ef}}} = \gamma_V \cdot E^2, \quad (34)$$

kde R_V je vnitřní elektrický odpor dielektrika, ρ_V je vnitřní rezistivita dielektrika, γ_V je vnitřní konduktivita dielektrika a E je intenzita vnějšího působícího elektrického pole.

Při namáhání izolačních materiálů stejnosměrným elektrickým polem se pochopitelně mohou uplatnit i ionizační ztráty. Jejich význam bývá však ve srovnání s vodivostními ztrátami nevýznamný [5].

1.4 Diagnostické metody zjišťování stavu izolačních materiálů

1.4.1 Stejnosměrné měřicí metody

Metody používané pro měření odporu lze rozdělit na

- **přímé** – založeny na současném měření stejnosměrného napětí připojeného na neznámý odpor a proudu, který tímto odporem protéká (voltampérová metoda)
- **porovnávací** – určují poměr neznámého odporu a známého odporníku v můstkovém zapojení nebo porovnávají proudy tekoucí přes odpory při konstantním napětí

Metoda měření absorpčních a resorpčních charakteristik

Je to metoda, při které se měří nabíjecí a vybíjecí proud, procházející vzorkem. Vyhodnocení absorpční a resorpční charakteristiky poskytuje cenné údaje. Jedná se o určení izolačního odporu R_X , polarizačních indexů p_{i1} , p_{i10} , dalších parametrů, kterými jsou redukované resorpční křivky a velikosti ploch pod absorpčními i resorpčními křivkami. Další získávané parametry z absorpčních a resorpčních charakteristik jsou výše zmiňované polarizační indexy, které se často využívají pro svou dobrou výpovědnost. Pro popis

stavu materiálu využívají časovou proměnnost absorpčního proudu. Polarizační indexy jsou nezávislé na rozměrech měřených předmětů. Vypočítají se ze vztahu:

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{15} + i_{\infty}}{i_{60} + i_{\infty}} \quad (35)$$

Hodnocení absorpce a resorpce lze provádět také vyjádřením (integrací) plochy pod absorpční, případně resorpční křivkou. V případě ideálního sledovaného průběhu absorpčního nebo resorpčního proudu, lze určit tuto plochu analytickou metodou, což je možné pouze v teoretické rovině. V praxi se využívá některá numerická metoda [11].

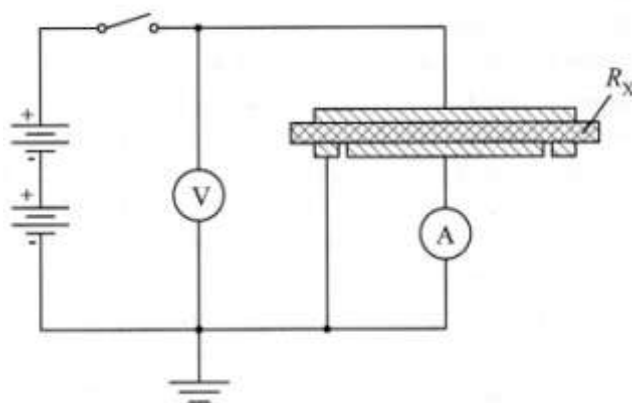
Voltampérmetrová metoda

Patří mezi nepoužívanější metody pro **přímé** měření velmi malých proudů. Tato metoda vychází ze zapojení na obr. 18. Zdroj napětí pro toto měření musí být dostatečně stabilní. Napěťové hladiny stejnosměrného napětí se doporučují volit v rozsahu 100, 250, 500, 1 000, 2 500, 5 000, 10 000, 15 000 V. Pro měření protékajícího proudu se doporučuje používat ampérmetr s minimální citlivostí 10^{-12} A.

Neznámý odpor se vypočítá pomocí vzorce:

$$R_x = \frac{U}{I_x} \quad (36)$$

kde U je připojené napětí a I_x je proud protékající vzorkem.



Obr. 18 Voltampérmetrová metoda pro měření odporu izolantů [5]

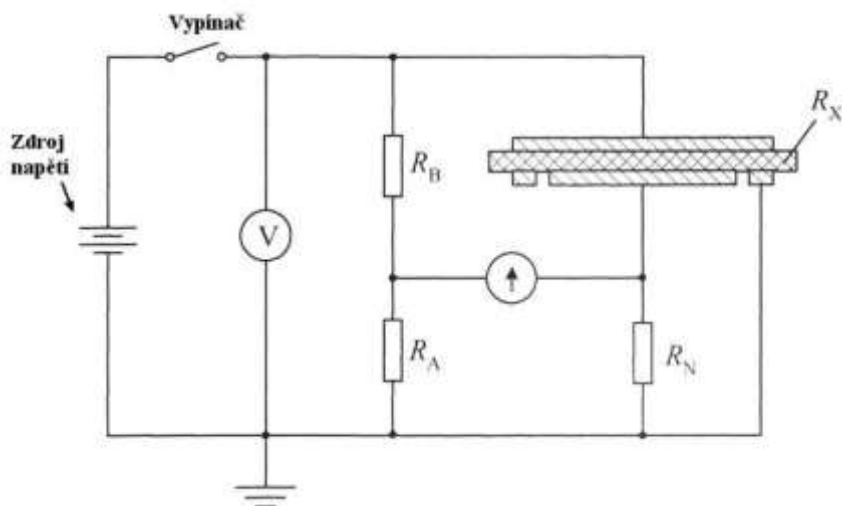
Metoda Wheatstonova můstku

Tato metoda funguje na principu porovnávání neznámého odporu R_X se známým referenčním odporem R velké hodnoty. Jak je vidět na obr. 19, neznámý odpor R se skládá ze tří sérioparalelně zapojených odporů. Odpor R_B , který se mění v dekadových stupních, odpor R_A , který slouží pro jemné vyrovňování a odpor R_N , jehož hodnota se nemění. Jestliže je takové odporové zapojení vyvážené, protéká větví A i B stejný proud a nulový indikátor zobrazuje nulovou výchylku. V takovém případě platí pro neznámý odpor R_X vztah:

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_B}{R_A}, \quad (37)$$

kde R_A , R_B a R_N jsou odpory můstku.

Tato metoda se nehodí pro měření, kde proud tekoucí vzorkem je časově závislý a pochopitelně pro kvalitní izolanty [5].



Obr. 19 Metoda Wheatstonova můstku na měření vnitřního odporu [5]

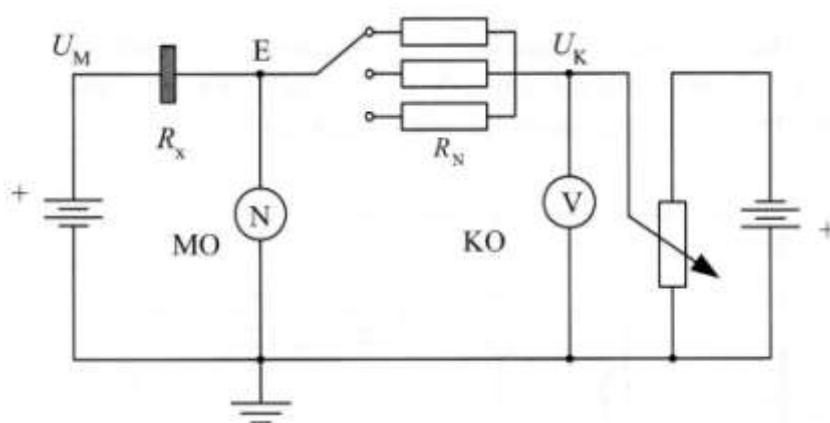
Kompenzační metoda

Princip této metody spočívá v kompenzaci úbytku napětí na odporovém normálu R_N pomocí proměnného napětí U_K . Při této metodě, jak je vidět na obr. 20, se měřicí obvod skládá ze dvou částí. První část se nazývá měrný obvod a skládá se ze zdroje měrného napětí U_M , neznámého odporu R_X a nulového indikátoru N . Druhá část obvodu se nazývá kompenzační a skládá se z referenčního odporu R_X , zdroje kompenzačního napětí U_K a voltmetru V . V okamžiku, kdy bude měrným a kompenzačním obvodem protékat proud

o stejné velikosti, ukáže nulový indikátor nulovou výchylku a obvod se bude nacházet v tzv. vykompenzovaném stavu a pro neznámý odpor R_X bude platit vztah:

$$R_X = R_N \cdot \frac{U_M}{U_K} \quad (38)$$

kde U_M je měrné napětí a U_K je kompenzační napětí měřené voltmetrem.



Obr. 20 Princip kompenzační metody [5]

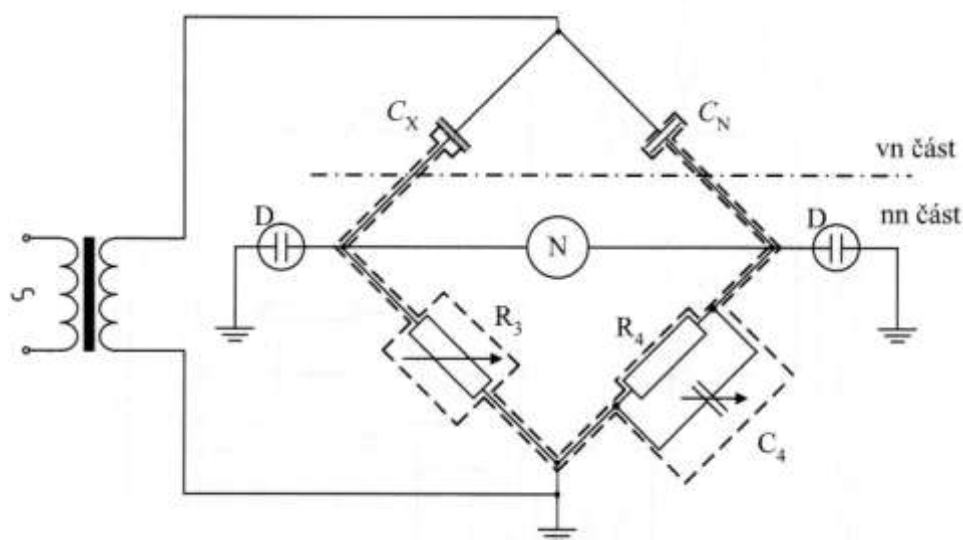
1.4.2 Střídavé měřicí metody

Nejpoužívanějším principem je metoda využívající zapojení Scheringova můstku. Lze pochopitelně použít i jiné můstky jako například transformátorový, paralelní, T-můstek i další. Výrobci můstků rozvíjejí tyto metody co do přesnosti i co do zjednodušování obsluhy, tedy vlastně eliminace lidského faktoru a jím zanášených nepřesností do měření. V následujícím textu se zaměříme na metody, které jsou v praxi používány nejvíce [5].

Metoda Scheringova můstku

Můstek sestává ze dvou hlavních částí. Z první části, jejíž prvky jsou umístěny ve vysokonapěťové části zkušebny a druhé části sloužící k vyvažování mimo vysokonapěťovou část. Galvanické oddělení obou částí tvoří vzorek v příslušném elektrodovém systému a kapacitní normál. Nízkonapěťová část slouží k nastavení rovnováhy. K vyvažování slouží odporová dekáda R_3 a kapacitní dekáda C_4 . Dekádou R_3 se vyrovnává kapacitní složka náhradního sériového obvodu a dekáda C_4 slouží k vyrovnání odporové složky. Rovnovážný

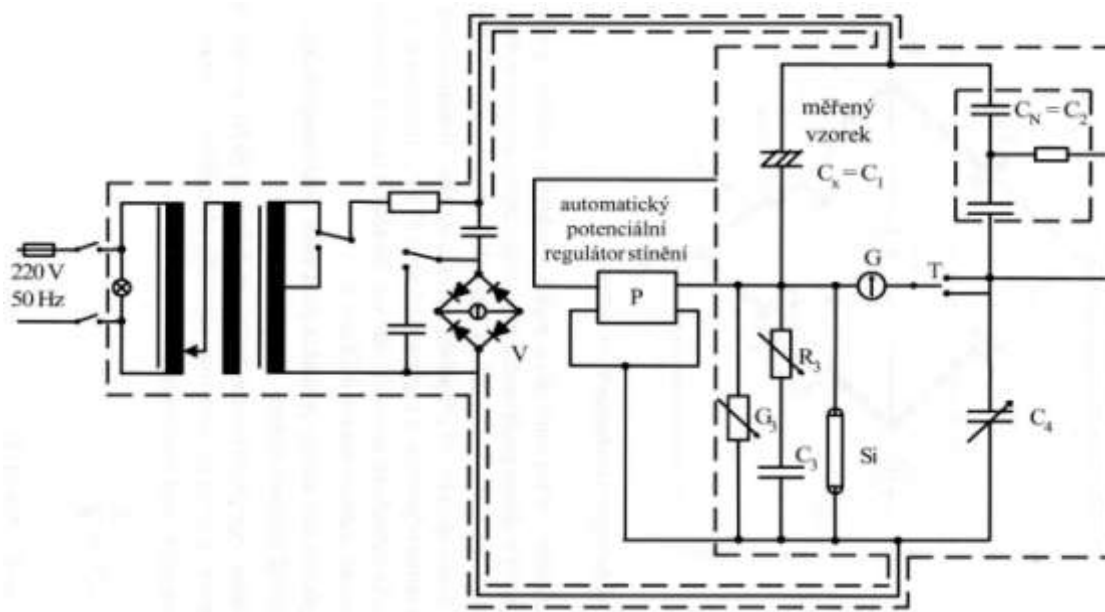
stav indikuje nulový indikátor N . Nízkonapěťová část můstku musí být stíněna proti vlivu elektromagnetických parazitních polí, která mají vliv na přesnost měření. Schéma můstku je znázorněno na obr. 21 [5].



Obr. 21 Scheringův vysokonapěťový můstek [5]

Metoda čtyřkapacitního můstku

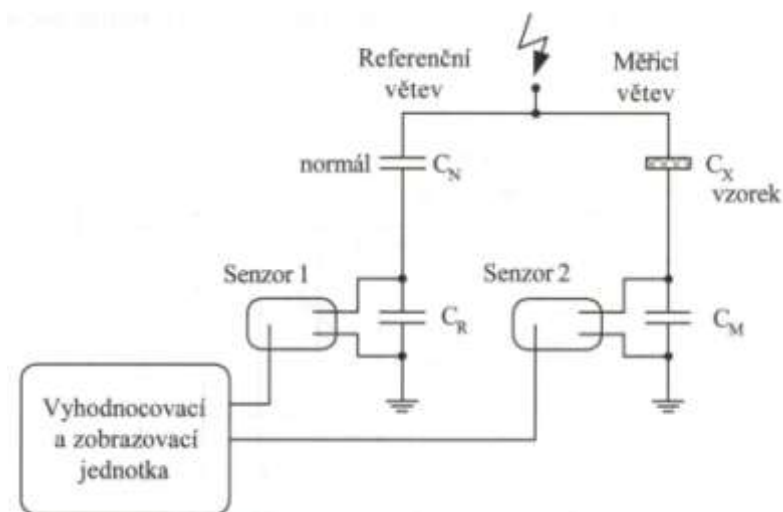
Tento můstek se odlišuje od Scheringova můstku tím, že má ve všech větvích kapacity, což má za následek zvýšenou impedanci ve všech větvích, a tím vyšší citlivost i přesnost měření. Můstek má zabudovaný vlastní napájecí zdroj, který zaručuje čistý sinusový průběh napětí. Parazitní kapacity přívodů a měrných kondenzátorů, které mohou ovlivnit měření, jsou kompenzovány zabudovaným stíněním a vestavěným automatickým potenciálním regulátorem P . Vyrovnání můstku se děje pomocí elektronického nulového indikátoru, který má regulovatelnou citlivost. Kapacitní dekáda C_4 vyrovnává měření neznámé kapacity C_X . Ztráty vzorku jsou vyrovnávány odporovou dekádou R_3 a vodivostní dekádou G_3 ve třetí můstkové větvi. Velikost ztrátového činitele $\tan \delta$ se odečítá přímo na stupnici ovládacích prvků můstku. Schéma můstku je znázorněno na obr. 22 [5].



Obr. 22 Zapojení čtyřkapacitního Scheringova můstku [5]

Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát

Slouží k automatickému zobrazení $\tan \delta$, C_X a U_{zk} . Vychází z klasického principu Scheringova můstku. Oproti konvenčním můstkům nemusí být tento úplně vyvážen, protože se vlastně měří fázový úhel mezi dílčími napětími. Jako kapacitní děliče slouží samotné větve můstku. Ztrátový činitel $\tan \delta$ se určuje z fázového úhlu mezi napětími na kondenzátorech C_M a C_R . Tato napětí jsou digitalizována senzory 1 a 2 s bateriovým napájením a signály jsou dále přenášeny do počítače, kde se zpracují za použití rychlé Fourierovy transformace – je určen $\tan \delta$. C_X se pak určuje z dělicího poměru měřicí větve. Chyby vzniklé parazitními kapacitami jsou eliminovány tím, že v nízkonapěťové části můstku jsou použity kromě odporů i kondenzátory. Schéma můstku je znázorněno na obr. 23 [5].

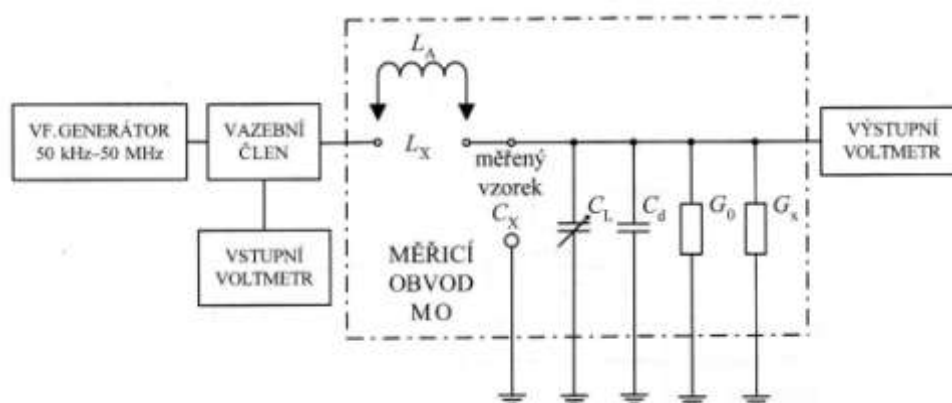


Obr. 23 Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát [5]

Rezonanční metoda měřením nakmitaného napětí (Q – metr)

Tato metoda se používá pro měření v oblasti vysokých kmitočtů, 10 kHz až stovky MHz. Přístrojem pro měření je Q-metr, neboli přístroj pro měření obecných impedancí. Při měření je zjišťován činitel kvality Q , tedy podíl nakmitaného napětí na reaktanci obvodu a vstupního napětí ze zdroje. Proměřované dielektrikum v měrném kondenzátoru zapojeném v sériovém rezonančním obvodu je měřenou impedancí. Ztrátový činitel $\tan \delta$ je určován jako rozdíl kvality rezonančního obvodu Q s připojeným a bez připojeného vzorku. Měrný obvod MO je sériový rezonanční obvod, který se skládá z měrného laditelného kondenzátoru C_L , v sérii se svorkami L_X , kde se připojuje při měření $\tan \delta$ pomocná cívka s takovou hodnotou, aby rezonovala při dané frekvenci. Na svorky C_X , se paralelně k laditelnému kondenzátoru C_1 připojuje mikrometrický měrný kondenzátor s měřeným dielektrikem.

Princip měření spočívá v substitučním měření ztrát kondenzátoru C_d na základě měření činitele jakosti Q obvodu v rezonanci. Měření $\tan \delta$ probíhá měřením Q obvodu s připojeným vzorkem dielektrika (měření 1) a bez vzorku (měření 2). Při prvním měření je změřeno Q_1 při vzdálenosti elektrod mikrometrického kondenzátoru d_1 , která je tloušťkou vzorku. Druhé měření, tedy měření bez připojeného vzorku, probíhá tak, že je změřena hodnota Q_2 a zmenšená vzdálenost elektrod d_2 , při níž se obvod rozkmitá do rezonance. Schéma rezonanční metody je uvedeno na obr. 24 [5].



Obr. 24 Schéma rezonanční metody [5]

1.5 Degradační mechanismy

Degradace, neboli stárnutí dielektrik se projevuje fyzikálními i chemickými změnami, k nimž dochází v závislosti na čase komplexním působením různých vlivů a podmínek. Je charakteristická trvalým zhoršením vlastností, jako je povrchová a vnitřní rezistivita, ztrátový činitel, relativní permitivita a elektrická pevnost. Největší vliv na tyto změny mají tepelné cykly, vzdušný kyslík, mechanické namáhání, klimatické a chemické vlivy. Změny, které tyto faktory způsobují, můžeme rozdělit, podle doby jejich účinku, na změny **vrátné** a **trvalé**. **Vratné změny** jsou dočasné a odezní po ukončení působení vlivů, které je vyvolaly. Mezi vratné vlivy patří například navlhčení. Kdežto **trvalé změny** jsou nevratné. Tyto změny bývají obvykle strukturálního charakteru, a to znamená, že vlastnosti materiálu se trvale mění, zpravidla zhorší.

Stárnutí se výrazně uplatňuje u látek organických, látky anorganické až na výjimky nestárnou. Se stárnutím úzce souvisí doba života izolačního systému a tím i doba života elektrického zařízení. Doba života dielektrik charakterizuje dobu použitelnosti elektrického zařízení s ohledem na jeho spolehlivost a bezpečnost [15].

1.5.1 Tepelné stárnutí

Teplota bývá hlavní příčinou stárnutí nízkonapěťových dielektrik. Nevratné fyzikálně chemické změny jsou způsobeny řadou chemických reakcí (polymerizace, oxidace aj.). Rychlost těchto reakcí se projevuje i při pokojové teplotě, ale vzrůstá společně s teplotou. U řady materiálů se projevuje především pomalá oxidace vzdušným kyslíkem, rychlost této oxidace závisí na druhu izolace, přístupu kyslíku a teplotě. Způsobuje strukturální změny

dielektrik, v materiálu vznikají zplodiny, které zvyšují elektrickou vodivost a ztrátový činitel. U organických polymerů se při oxidaci trhají makromolekuly. Rychlost procesu roste se vzrůstající teplotou. Přetrháváním makromolekul, vlivem oxidace, klesá mechanická pevnost a současně se zhoršují elektrické vlastnosti. Při tepelném namáhání dochází často k poklesu podílu změkčovadel, čímž materiál tvrdne a křehne a opět se zhoršují jeho elektrické vlastnosti. U všech makromolekul se při zvýšené teplotě vyskytuje rozpad neboli depolymerace, a to i bez přístupu kyslíku. Kromě těchto reakcí mohou působit i další vlivy, jako je elektrolyza. S ohledem na tepelné stárnutí byla dielektrika rozdělena do tepelných tříd a zavedena mezní teplota pro každou třídu.

Jeden z prvních pokusů o číselné vyjádření účinků tepelného namáhání a o algebraické vyjádření závislosti stárnutí na čase provedl Montsinger. Ten studoval dobu života t papírové izolace vodičů v olejových transformátorech. Měřil úbytek mechanické pevnosti papíru v závislosti na konstantní teplotě [16]. Na základě svých výsledků pak sestavil rovnici

$$t = A e^{-N T} \quad (39)$$

kde t je doba života izolace, N a A jsou materiálové konstanty a T je trvalá teplota stárnutí.

Montsinger zjistil, že doba života t izolace klesne při navýšení teploty o $\Delta\vartheta = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ na polovinu a naopak při snížení teploty o $\Delta\vartheta = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ se doba života prodlouží na $2t$. Toto pravidlo je označováno jako Montsingerovo pravidlo osmi stupňů. Platí však jen pro papír v oleji a pro úzký rozsah teplot.

Podrobnější popis tepelného stárnutí izolantů z hlediska chemického procesu je důležitý pro lepší představu o teorii stárnutí. Výraz (39) totiž není podložen teoretickým rozbořem, avšak při degradaci organických látek stárnutím jde o soubor chemických procesů. Tyto reakce se musí řídit určitým teoretickým postupem, kterému podléhají i všechny ostatní chemické děje. Protože stárnutí organických materiálů je soubor chemických reakcí, které zhoršují jejich fyzikální vlastnosti, je patrné, že rychlost chemické reakce odpovídá rychlosti stárnutí. Rychlostní konstanta k je úměrná době, za kterou v izolantu proběhly všechny procesy, způsobující jeho znehodnocení. Touto úvahou dospěl Büssing [16] k vyjádření životnostního zákona

$$t = B e^{\frac{b}{T}} \quad (40)$$

kde t je doba života izolace, b a B jsou materiálové konstanty a T je trvalá teplota stárnutí.

1.5.2 Elektrické stárnutí

Zahrnuje všechny druhy namáhání, které jsou způsobené vlivem elektrického napětí a je jedním z velmi důležitých faktorů, které ovlivňují stárnutí izolačních systémů. Rozdělení elektrického namáhání spočívá v dělení na namáhání střídavým napětím sinusového průběhu a napětím stejnosměrným, kde střídavé napětí s frekvencí 50 Hz je v současné době nejčastější namáhání točivých strojů. V elektrotechnice existují dlouholeté zkušenosti a je vypracována řada metodik zkoušek střídavým napětím a jsou známy časové závislosti elektrických parametrů. Svým charakterem se jedná o stárnutí zejména maximální hodnotou přiváděného napětí. Při namáhání stejnosměrným napětím dochází především k problémům vytvářením prostorového náboje, jinak se při návrhu izolačního systému bere v úvahu zejména vodivostní proud a napěťová odolnost [11].

Elektrické namáhání materiálů je jedním z dominantních faktorů ovlivňujících namáhání izolačního systému. Většina poznatků jsou spíše empirického charakteru. Pro modelování vlivu elektrického pole na dobu života materiálu jsou používány následující modely:

mocninný model

$$\tau_E = k E^{-n} \quad a \quad (41)$$

exponenciální model

$$\tau_E = e^{-lE} \quad (42)$$

kde τ_E je doba života, E je intenzita elektrického pole a konstanty a , k , n , l jsou konstanty, které je třeba určit empiricky.

Zmíněné modely popisují stárnutí v jakémkoliv materiálu, který je vystaven působení elektrického pole. Pro tyto modely není třeba dokonale znát všechny procesy, které elektrické pole v materiálu indukuje, ani další okolnosti, jako např. přítomnost částečných výbojů. Model dokonce není závislý, ani na struktuře systému, ani na konfiguraci elektrod a rozložení elektrického pole. Vztahy (41) a (42) jsou pouze empiricky odvozené modely, které popisují vliv intenzity elektrického pole na stárnutí izolačního systému. Přesto tyto modely poskytují poměrně dobré výsledky a vypočtené doby života korespondují s realitou. Zmíněné modely

(zejména exponenciální model) selhávají při nižších hladinách intenzity elektrického pole. To je vysvětlováno teorií, podle které existuje určitá prahová intenzita, pod kterou již elektrické pole stárnutí materiálu nezpůsobuje [17].

1.5.3 Mechanické stárnutí

Materiály jsou, kromě elektrického namáhání, vystaveny také působení mechanických sil. Při konstruování je tedy nutné znát mechanické vlastnosti používaných materiálů. Zkoušení materiálů je v praxi nezbytnou součástí, nejen vlastního výrobního postupu, ale i kontroly výrobků a je i důležitým prostředkem a základem vývojových a výzkumných prací. K posuzování mechanických vlastností materiálů slouží mechanické zkoušky.

Mechanické zkoušky dělíme podle několika hledisek:

- podle teploty, při které se zkouška provádí, a to na zkoušky při normální teplotě a zkoušky při zvýšené či snížené teplotě
- podle charakteru působící síly na statické (rychlost zatěžování vzorku je konstantní), dynamické (síla narůstá rychle, během krátkého okamžiku dosahuje síla maxima) a únavové (cyklické, síla mění jak svou velikost, tak i směr)
- podle druhu působícího namáhání, a to na zkoušku tahem, tlakem, krutem, střihem a ohybem

Modely mechanického namáhání vycházejí z různých předpokladů. Existuje jich velké množství v závislosti na různých vlastnostech materiálů a různých druzích mechanického namáhání. Například Odingův exponenciální model vycházející z teorie mechanismu růstu trhlin při tahovém napětí. Model předpokládá, že vakantní místa se budou přemisťovat z objemu, který podléhá pružnému roztažení, do objemů méně roztažených [17].

$$\tau_M = \left(\frac{C}{A}\right)^{\frac{1}{m}} e^{-\left(\frac{\alpha+\beta}{m}\right)\sigma} \quad (43)$$

kde τ_M je doba do lomu, σ je mechanické napětí, m je ukazatel charakterizující způsobilost hromadit vakance, α je parametr a C, A, β jsou konstanty.

1.5.4 Kombinované stárnutí

Výsledné namáhání není jen součtem dvou po sobě následujících vlivů. Při působení teploty a elektrického pole současně dochází k degradaci a následnému selhání materiálu (průrazu izolantu) dříve než při působení těchto vlivů jednotlivě. To nastává v případě, že dochází k interakci těchto dvou vlivů. Rozlišují se dva základní druhy interakce:

Přímá interakce

Je to stav, kdy se jednotlivé působící vlivy navzájem ovlivňují do takové míry, že jejich současné působení je odlišné od stavu, kdy působí jednotlivě. Příkladem přímé interakce je oxidace za zvýšené teploty. Samotné zvyšování teploty nemá na materiál radikální vliv, ovšem za přítomnosti kyslíku značně urychluje oxidační proces. Samotná oxidace při pokojové teplotě nemá na degradaci vliv.

Nepřímá interakce

Situace, kdy několik faktorů působí současně, ale jednotlivé vlivy zůstávají nezměněny, jakoby působily každý zvlášť. Nepřímá interakce je například působení mechanického namáhání a elektrického pole. Mechanické namáhání totiž může způsobit praskliny, ve kterých se tvoří částečné výboje a dochází tak k rychlejšímu stárnutí materiálu.

Působení více faktorů najednou je nutné zahrnout do matematických modelů. V současnosti se používá hned několik modelů popisujících chování materiálů při současném působení teploty a elektrického pole. Jsou to například: Simmoniho model, Ramuův model, Fallouův model, Montanariho model, Crineaův model. První tři jmenované modely jsou spíše empirické vztahy, do kterých je potřeba některé konstanty získat experimentálně, kdežto Crineaův model se snaží být plnohodnotnou fyzikální teorií stárnutí [17].

1.5.5 Zrychlené stárnutí

Podle normy ČSN EN 60505 Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů jsou známy různé úrovně namáhání. Subcyklus stárnutí musí simulovat namáhání, která budou působit v provozu. Při hodnocení elektroizolačního systému může být interakce mezi namáháními významná s ohledem na ovlivnění provozní životnosti. Při definici programu namáhání, která budou použita v průběhu zrychlené zkoušky, mohou tyto interakce znehodnotit postup vyhodnocení. Před rozhodnutím o programu stárnutí je vhodné provést zrychlené třídící zkoušky s jednoduchým a kombinovaným namáháním, aby mohlo být rozhodnuto o významu těchto interakcí. Jsou-li potvrzeny významné přímé interakce, nebo je-li jejich existence

známá z jiných programů hodnocení, mají být, kde je to možné, namáhání subcyklu stárnutí aplikována současně.

Je-li použito cyklické zkoušení, má být nastaven logický vztah mezi délkou cyklu, expozicí stárnutí a předpokládanými provozními namáháními. Doporučuje se délka cyklu při každé expozici namáhání taková, aby u zkoušeného předmětu nedošlo k poruše během deseti cyklů. Uživatel této normy musí stanovit, pro své konkrétní zařízení, hodnoty namáhání způsobující stárnutí. Doba a velikost namáhání mají být pevně určeny se zřetelem na nejlepší využití zkušebních zařízení, která jsou k dispozici.

V subcyklech jednotlivých namáhání jsou zkoušené předměty vystaveny najednou pouze jednomu faktoru. Faktory stárnutí v těchto subcyklech jsou ty faktory z referenčních pracovních podmínek, které působí v provozu samostatně nebo postupně [18].

1.6 Pulzní elektrické namáhání

Asynchronní motory se v minulosti používaly na pohony, kde nebylo nutné řídit otáčky motoru. V případě nutnosti regulace se používaly stejnosměrné motory, ty ale mají nevýhodu ve větší hmotnosti, jsou složitější a tedy i dražší. Abychom mohli využít výhod asynchronních motorů, je potřeba změny frekvence napájecího střídavého napětí. Díky měniči frekvence, kde otáčky motoru odpovídají frekvenci napájecího napětí, je zaručena plynulá regulace otáček motoru. Tyto pohony jsou využívány například ve výrobních linkách, trolejbusové, tramvajové a vlakové dopravě. V současné době se využívají u hybridních pohonů automobilů. Díky moderním zpracovatelským technologiím a vývoji materiálů probíhá neustále vývoj nových spínacích součástek, které mají za následek možnost využívat náročnější aplikace v oblasti řízení elektrických pohonů. Tím jsou zajištěny rychlejší spínací pochody a stále dokonalejší způsoby regulace pohonů. S urychlením spínacích procesů jsou spojeny i negativní aspekty jejich používání. Bylo zjištěno zvýšené oteplení některých částí izolačního systému, změny účinnosti, pulzní namáhání izolace, růst ztrátového činitele a zvýšená aktivita výbojové činnosti [13].

Existuje celá řada zařízení, která je možno označit jako zdroje pulzů, působících jako zátěž na izolační systémy. Mezi ně patří [23]:

- **pulzní měnič napětí** – zdroj stejnosměrného napětí, které je složeno z jednotlivých sepnutí a vypnutí spínací součástky
- **měníč frekvence** – zdroj pulzů pro modulaci výstupního napětí, využívá se při přeměně stejnosměrného napětí na střídavé, v pohonech s asynchronním motorem

- **atmosférický výboj** – náhodný pulz, který se šíří po vedení a modeluje se vlnou $1,2/50 \mu s$, při správné funkci přepětové ochrany dojde (po svedení vlny do země) ke vzniku napětové hrany
- **pulzy způsobené provozními procesy** – např. vyvolané vypnutím nebo zapnutím velké zátěže

Vlivem působení pulzního namáhání dochází k celé řadě degradačních procesů, které by působením stejnosměrného nebo harmonického napětí nevznikaly. Jiné degradační procesy jsou vlivem pulzního namáhání urychleny. Při namáhání působí řada činitelů ovlivňující daný materiál. Těmito činiteli mohou být například [20]:

- **Vliv teploty** – při zvýšené teplotě se značně mění elektrická degradace. Rychlost degradace se může zvýšit, jestliže se zvýší dielektrické ztráty, což způsobuje další nárůst oteplení v místě vysokého elektrického namáhání. Vyšší teplota materiálu rovněž zvyšuje permitivitu, to má za následek zvýšení výbojové činnosti.
- **Vliv mechanického namáhání** – jak statické, tak dynamické mechanické namáhání významně zvyšuje elektrickou degradaci. Vytváří nebo rozšiřuje poruchy v materiálu, ve kterém elektrické pole spojené s opakovanými impulzy snáze vyvolává částečné výboje.
- **Vliv vlhkosti okolního prostředí** – mění elektrickou pevnost vzduchu, což má za následek změnu výbojové činnosti. Vlhkost v okolním vzduchu ovlivňuje rozdělení elektrického namáhání nebo vodivost elektrických nábojů na povrchu izolace, a tím mění rychlost degradace.
- **Vliv velikosti napětí a charakteristik impulzního napětí** – rozdělení napětí je odlišné při pulzním napětí a při napětí průmyslové frekvence. Na rychlosti namáhání má velký vliv doba čela napětového impulsu (závisí na ní i fyzikální procesy degradace), velikost přiloženého napětí (čím vyšší je přiložené napětí, tím větší je rychlost namáhání). K degradaci dochází i v důsledku procesu injekce prostorového náboje a částečných výbojů.
- **Vliv rychlosti opakování impulsů** – rychlost opakování napětových impulsů může mít kladný nebo záporný vliv na počet impulsů potřebných pro vyvolání poruchy. Při vyšších rychlostech opakování impulsů může dojít k většímu dielektrickému ohřevu, což má za následek menší počet impulsů do poruchy. Naopak u některých degradačních procesů závislých na částečných výbojích a prostorovém náboji nemůže při vyšších opakovacích rychlostech dojít k rozpadu nábojů, což má vliv na počet impulsů potřebných pro vyvolání poruchy.

- **Vliv polarity impulzů** – rychlost degradace je ovlivněna oscilačním charakterem impulzů. Unipolární impulzy způsobují menší degradaci než bipolární impulzy stejné velikosti. Specifický tvar impulzu (s výjimkou doby čela impulzu) nemá velký vliv na odolnost materiálu.

Pulzní napětí může způsobovat:

- **Růst ztrátového činitele** – při pulzním namáhání dochází k nárůstu ztrátového činitele v mnohem větším měřítku než při namáhání pouze sinusovým napětím. Přítomnost pulzů v zařízení je spojena s nárůstem ztrát, vznikem naindukovaných proudů a tím s růstem teploty celého zařízení k urychlení degradačních procesů.
- **Zvýšení teploty izolace** – při napájení motorů z napět'ových střídačů a měničů frekvence dochází ke zvýšení teploty izolace. Za normálního provozu se izolace motorů ohřívá vlivem průchodu elektrického proudu, vlivem přemagnetizování a tření. Při vyšších teplotách je degradace izolace rychlejší.
- **Částečné výboje** – jsou to elektrické výboje, které částečně přemost'ují izolaci mezi vodiči nebo elektrodami o různých potenciálech. Jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci. Takovéto výboje se objevují jako impulzy s dobou trvání menší než 1 μ s. Výbojová činnost hraje roli v degradaci izolačních systémů vyšších napět'ových hladin. Obecně se projeví při napětích větších než 1 kV a můžeme ji rozdělit na výboje drážkové (probíhají mezi izolací a stěnou drážky), klouzavé (na výstupu izolované tyče vinutí z drážky) a vnitřní (v mikrodutinách materiálu). Částečné výboje negativně ovlivňují vlastnosti izolačních systémů a snižují jejich spolehlivost a životnost. Působí na izolační systémy elektrickými, chemickými a tepelnými vlivy [13].

V důsledku opakovaných impulzů napětí existují dvě metody pro hodnocení schopnosti elektroizolačního systému odolávat degradaci:

Třídící zkouška

Provádí se při jednom zkušebním napětí pro hodnocení alternativních materiálů porovnáním s dříve hodnoceným elektroizolačním systémem. Účelem je najít materiál, který zajišťuje lepší odolnost. Třídící zkouška definuje typický soubor zkušebních podmínek a charakteristik pulzního napětí, které budou platit pro všechny hodnotné materiály.

Zkouška odolnosti

Provádí se pro odhad vztahu mezi pulzním napětím a životností pro elektroizolační systém, který má být hodnocen při různých úrovních napětí (ostatní podmínky jsou konstantní). Vztah mezi napětíovou odolností a velikostí napětí je možné vyjádřit [20]:

inverzní mocninový model

$$L = k U^{-n} \quad (44)$$

exponenciální model

$$L = A e^{-hU} \quad (45)$$

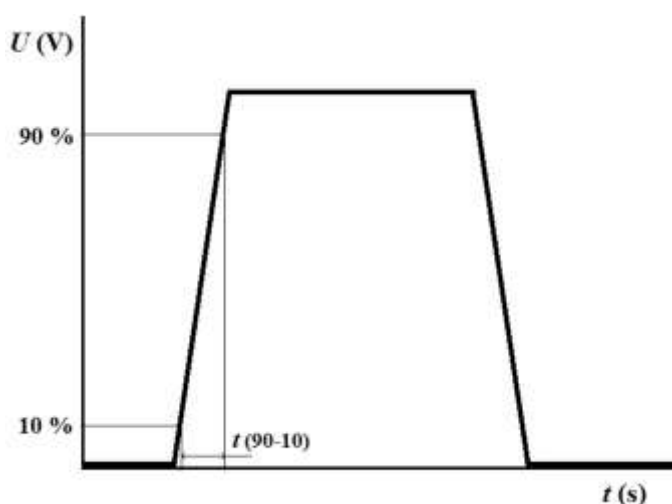
kde L je doba bezporuchovosti provozu nebo počet impulzů do poruchy materiálu, U je přiložené napětí, n je koeficient napětíové odolnosti a k , h , A jsou konstanty.

1.6.1 Norma ČSN pro elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy

Pulzním namáháním se zabývá česká technická norma ČSN EN 62068-1 „Elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy“, která zavádí termíny a definice [20]:

- **elektroizolační materiál (EIM)** je elektricky namáhaná součást v elektroizolačním systému
- **elektroizolační systém (EIS)** je izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů spolu s přidruženými vodivými částmi, použita v elektrotechnickém zařízení
- **částečný výboj** je elektrický výboj, který pouze částečně přemostí izolaci mezi vodiči
- **unipolární impulz** je napětíový impulz, jehož polarita je buď kladná, nebo záporná
- **bipolární impulz** je napětíový impulz, jehož polarita se mění od kladné k záporné nebo naopak

- **doba čela impulzu** určuje 1,25násobek časového intervalu mezi 10 % a 90 % vrcholové hodnoty impulzního napětí na čele impulzu (obr. 25)
- **rychlost nárůstu napětí** je 0,8násobek velikosti impulzního napětí dělený časovým intervalem mezi 10 % a 90 % vrcholové hodnoty impulzního napětí (obr. 25)
- **koeficient napěťové odolnosti** je exponent inverzního mocninového modelu (44) nebo exponenciálního modelu (45), který společně s koeficientem k popisuje vztah mezi životností a napětím.



Obr. 25 Strmost nárůstu napětí

Pulzní napětí přiváděná na svorky mají různé průběhy. Závisejí na spínacích součástkách (ovlivňují strmost nárůstu a poklesu napětí), na použitém měniči, na filtrech a na frekvenci spínání. Pro simulaci vlivu měniče na izolační materiál je možno použít jednoduchý tvar pulzů, kde je důležité zajistit vysokou strmost nárůstu a poklesu napětí na vzorku. Strmost přesahující $500 \text{ V } \mu\text{s}^{-1}$ již způsobuje zrychlenou degradaci materiálu. V dnešní době jsou již běžně dosahovány strmosti $20 \text{ kV } \mu\text{s}^{-1}$ (které výrazně převyšují strmosti dosahované dříve). Každá konkrétní zkouška má mít zkušební charakteristiky, které jsou vhodné pro prostředí a pro typ použitého zařízení. V tabulce 2 je uveden příklad rozsahu charakteristik impulzního napětí, které mohou být použity [20].

Tab. 2 Zkušební charakteristiky impulzního napětí [20]

Charakteristika	Jednotka	Rozsah
doba čela impulzu	μs	$0,04 \div 1$
rychlost opakování	kHz	$1 \div 20$
doba trvání impulzu	μs	$0,08 \div 25$
tvar		pravoúhlý, trojúhelníkový
polarita		bipolární, unipolární

1.6.2 Současné studie v oblasti pulzního namáhání

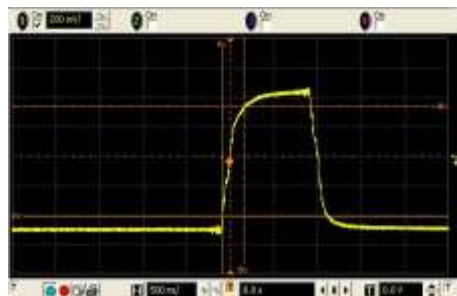
V současné době se dostává stále více do popředí zájmu diagnostika izolačních systémů elektrických strojů pracujících při pulzním napětí. Vlivy elektrického pole na vlastnosti izolačních materiálů jsou prováděny již dlouhá léta. Znalosti okolo elektrického stárnutí při frekvenci 50 Hz jsou již poměrně velké. Chování izolačních materiálů při pulzním napětí vykazuje odlišné závislosti, kterým je nutno věnovat pozornost, studovat je a popsát.

V této kapitole nastíníme vybrané experimenty jiných autorů, kteří se zabývají problematikou diagnostiky vlastností systémů při namáhání pulzním napětím.

Studie „**Vlivu pulzního namáhání na izolační systém elektrických strojů**“ se zabývá sledováním elektrických parametrů vybraných Resin-rich materiálů (tříslůžkový izolační systém, složený ze skleněné tkaniny a slídového papíru navzájem spojených cca 40 % modifikované epoxidové pryskyřice) hlavní drážkové izolace elektrických točivých strojů při expozicích sinusovým a pulzním napětím o různých frekvencích při vysoké strmosti náběžných hran napětí (cca $15 \text{ kV } \mu\text{s}^{-1}$). Vliv pulzního namáhání je sledován na vývoji elektrických parametrů: izolační odpor, ztrátový činitel a kapacita. Elektrické namáhání probíhalo na plošných vzorcích testovaných materiálů ($100 \times 100 \text{ mm}$, $0,5 \text{ mm}$ tloušťky) v definovaných dobách. Po každé z nich bylo na souboru vzorků provedeno měření elektrických parametrů definující jejich izolační stav [21].

Parametry napěťových pulzů:

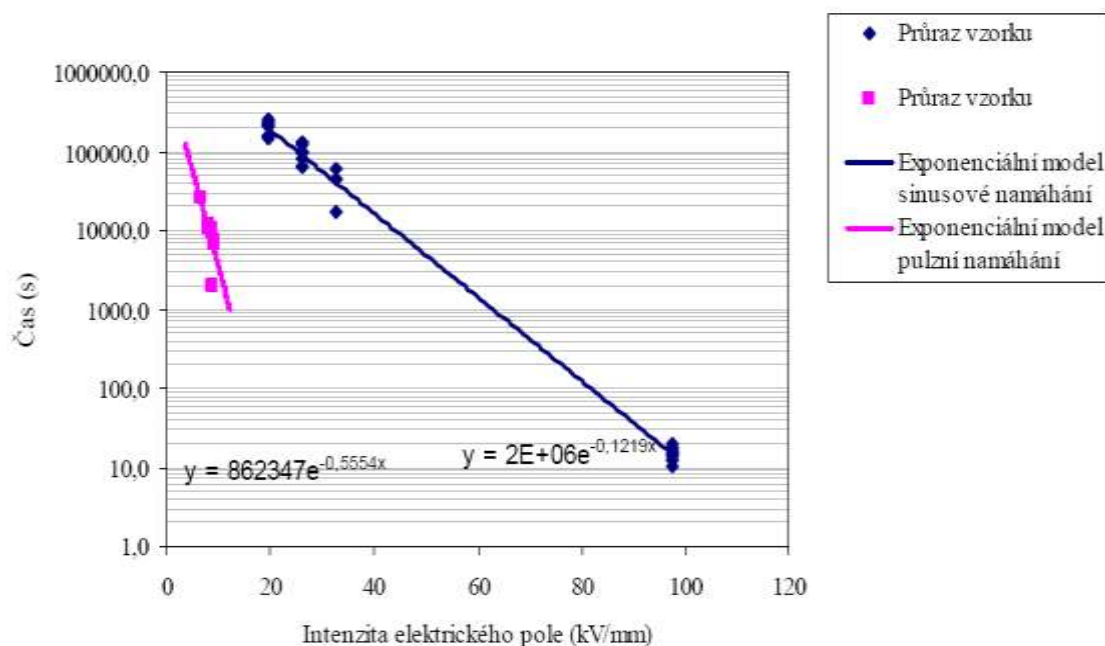
- bipolární polarita pulzů
- napětí ± 2 kV
- doba náběhu cca. 250 ns
- strmost náběhu $16 \text{ kV } \mu\text{s}^{-1}$
- frekvence 1 kHz



Obr. 26 Tvar pulzu simulujícího pulzní namáhání
[26[1]

Výsledek experimentu ukazuje, že ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ a kapacita C_x při napěťové hladině 1,5 kV vykazují vzrůstající tendenci úrovně u obou typů elektrického namáhání (sinusové i pulzní). Kapacita vzorků má ve všech případech stoupající obdobnou tendenci.

Studie „**Elektrického stárnutí složené izolace**“ se zaměřila na materiál s obchodním označením NEN - F 220/125 Viledom. Sledovanými parametry byly absorpční a resorpční proud, vnitřní rezistivita, vznik částečných výbojů a ztrátový činitel. Pozorované materiály byly namáhány dvěma různými průběhy napětí, a to střídavým napětím o frekvenci 50 Hz a pulzním napětím o frekvenci 6 kHz. Stanovení životnostní křivky probíhalo expozicí vzorků zvýšeným napětím různých hladin až do průrazu. Sledována byla doba do průrazu, která je vynesena i v životnostních křivkách uvedených v obr. 27. Měněny byly pouze hladiny napětí. Frekvence zůstávala vždy 50 Hz u střídavého namáhání a 6 kHz s šířkou pulzu $10 \mu\text{s}$ u pulzního namáhání [22].



Obr. 27 Životnostní křivka exponenciálního modelu pro materiál NEN sinusové a pulzní namáhání [22]

Provedená studie slouží jako základ dalšího zkoumání životnosti jednotlivých izolačních systémů v elektrickém pohonu s napěťovým střídačem. Pro zkoumaný materiál NEN je hodnota zkrácení životnosti při pulzním namáhání patrná z naměřených výsledků zobrazených v životnostních křivkách na obr. 27. Stárnutí izolačního materiálu je urychleno napěťovou strmostí přiváděných pulzů i hodnotou frekvence. Při vysokofrekvenčním pulzním namáhání má výbojová činnost jiný charakter než při střídavém napětí 50 Hz. Výbojová činnost začíná na mnohem nižších hodnotách napětí a poškozuje izolační materiál na menších vzdálenostech od elektrody [22].

2 Experimentální část

2.1 Zkušební vzorek

Zkoumaným materiálem pro diplomovou práci byl krystalický polystyren QUINN PS 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 čirém, 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, stolní stojany
- ✓ ploché nebo zaoblené dveře sprchových koutů, domácí potřeby
- ✓ vývěsky pro vnitřní použití, reklamní pulty, stínítka na lampičky

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. Použití: izolace kabelů, tyče a trubky pro elektrotechniku, kalíšky pro koaxiální kabely, dielektrikum pro kondenzátory [1].

Vlastnosti:

- $\varepsilon_r (10^6 \text{ Hz}) = 2,5$
- $\varepsilon_r = 1,00054$ (pro vzduch)
- $\text{tg } \delta (10^6 \text{ Hz}) = 3 \cdot 10^{-3}$

Tab. 3 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 Vicata (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. 4 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

Experimentální vzorky Quinn PS byly zkoumány pro tloušťky 2 mm, 3 mm a 6 mm. Bylo vyrobeno „šest“ vzorků o rozměru 74 x 70 mm, tzn. „osmnáct“ vzorků celkem. Vzorky byly označeny pořadovým číslem 1 – 6 pro všechny zvolené tloušťky. Následně pak byly vybrány vzorky tloušťky 3 mm, čísla 1, 3, 5 s označením *P* vystavené pulznímu namáhání a čísla 2, 4, 6 s označením *K* namáhané konstantním napětím.



Obr. 28 Zkušební vzorky uložené v eksikátoru s roztokem dusičnanu hořečnatého $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Pro přesné stanovení tloušťky vzorků byl použit mikrometr (obr. 29). 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.

Výsledný přehled vypočtených aritmetických průměrů tloušťky vzorku je uveden v Tab. 5 a dokumentu Excel na záložce „tloušťka vzorku“, který je přiložen na CD.

Tab. 5 Přehled aritmetických průměrů tloušťky vzorku

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



Obr. 29 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]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (46)$$

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 postihnutelné 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:

$$u_{BZ} = \frac{\Delta Z_{\max}}{\kappa}, \quad (47)$$

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

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

$$u_B = \sqrt{u_{BZ}^2} \quad (48)$$

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

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (49)$$

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

$$U = \kappa \cdot u \quad (50)$$

2.2 Měřicí zařízení

2.2.1 LCR metr Agilent E4980A

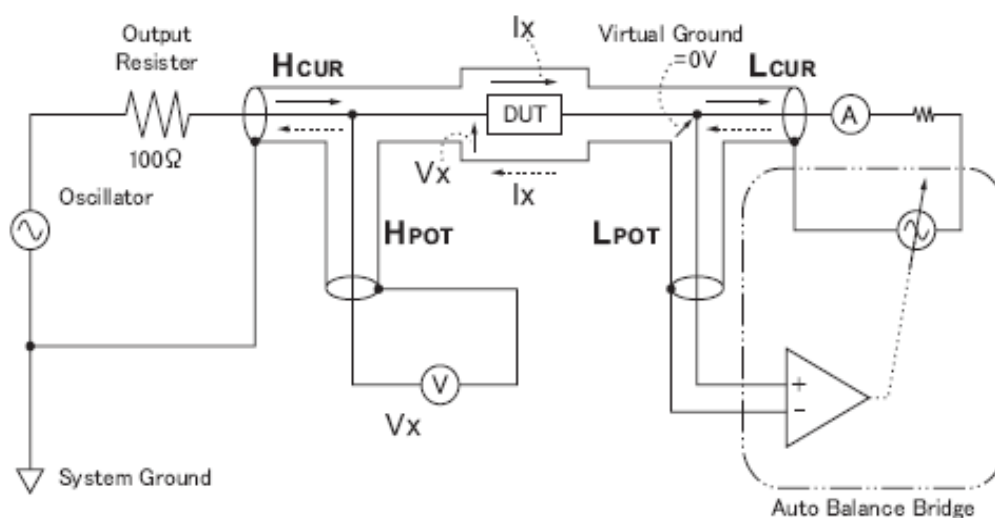
Složky komplexní permitivity byly v kmitočtové závislosti měřeny přesným LCR metrem firmy Agilent E4980A (obr. 30) ve spojení s tříelektrodovým systémem firmy Agilent 16451B (obr. 44). Tento LCR metr s frekvenčním rozsahem 20 Hz až 20 MHz pracuje na principu mostové metody s automatickým vyvažováním.



Obr. 30 LCR metr Agilent E4980A [7]

Zapojení je uvedeno na obr. 31, 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 měřicích komponentů. Měřicí rozsah přístroje je ideální pro použití v hlavních výzkumných, vývojových a výrobních testech součástí a materiálů. Velikost testovacích signálů v rozsahu proudů je $0 \mu A_{rms}$ až $20 mA_{rms}$ a v rozsahu napětí $0 mV_{rms}$ 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 měřicího procesu jsou plně automatizovaná. Obsahuje řadu měřicích módů, pro nás nejdůležitější = mód $C_p - D$ (Paralelní kapacita – ztrátový činitel), za pomoci kterého měříme dané vlastnosti zkoumaného prvku.



Obr. 31 Princip měření se čtyřvodičovým vedením [7]

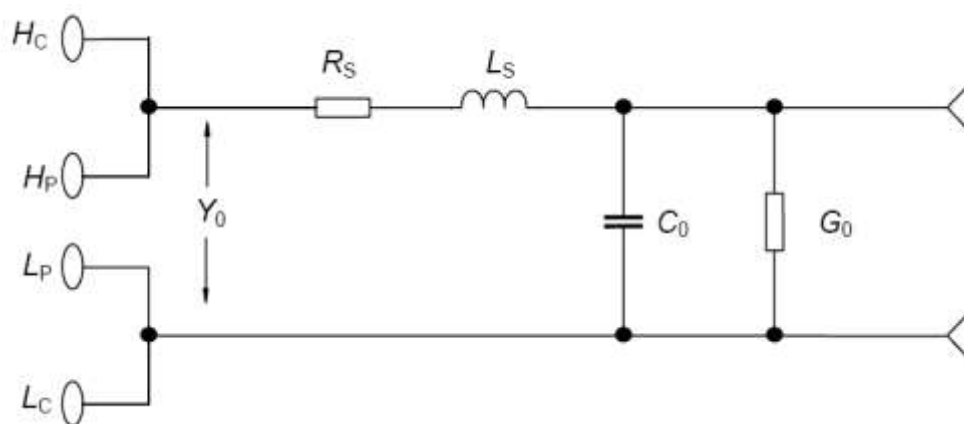
Při měření je nutné nastavit předepsané korekce. Přístroj je vybaven možností nastavení korekcí označených jako OPEN, SHORT, LOAD a délky vodičů, které slouží k přesnému nastavení počátečního stavu elektrodového systému. Korekce LOAD slouží pouze pro předem definované kmitočty a při měření nebyla využita. 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 měřicí elektrodu) [8].

Korekce OPEN

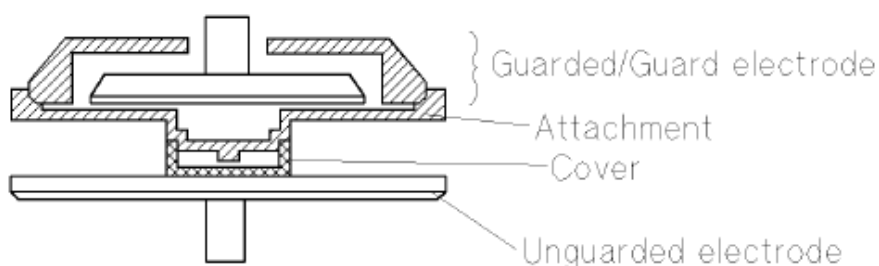
Korekce OPEN (naprázdno) slouží k eliminaci parazitní kapacity C_p (obr. 32 a rovnice (51)) je označena jako C_0 mezi vodiči měřícího zařízení a elektrodového systému. Pro její nastavení se používá speciální kalibrační elektroda s izolační krytkou, která od sebe oddělí elektrody elektrodového systému. Přístroj poté změří rozptylovou admitanci Y_0 , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0, \quad (51)$$

kde G_0 je parazitní vodivost mezi vodiči propojení. Popsaná situace je znázorněna na obr. 32. R_s je parazitní impedance vodičů a L_s je parazitní indukčnost vodičů.



Obr. 32 Schéma zapojení při měření rozptylové admitance Y_0 [8]



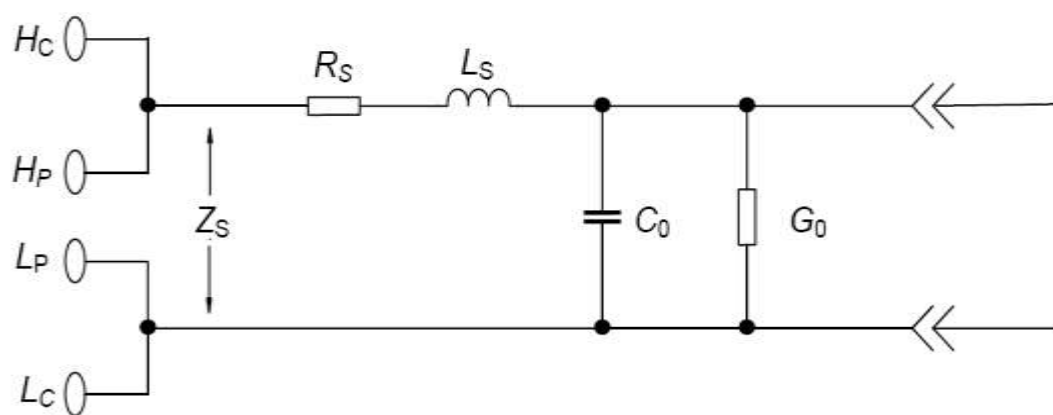
Obr. 33 Znázornění umístění speciální kalibrační elektrody s izolační krytkou [8]

Korekce SHORT

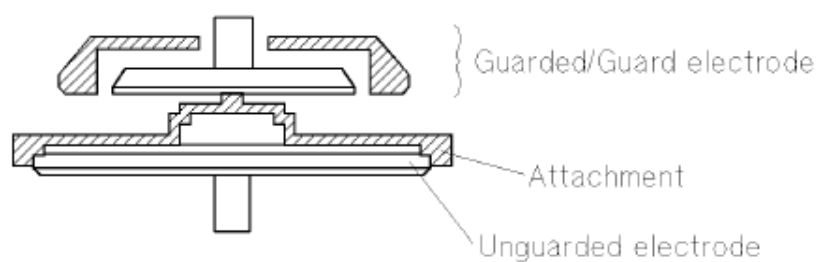
Korekce SHORT (nakrátko) slouží k eliminaci parazitní impedance R_S vodičů propojení měřicího zařízení a elektrodového systému (obr. 34). Pro její nastavení se používá speciální kalibrační elektroda, která zkratuje napěťovou a měřicí elektrodu elektrodového systému. Přístroj poté změří ztrátovou impedanci Z_S , kterou lze vyjádřit vztahem:

$$Z_S = R_S + j\omega L_S \quad (52)$$

Popsaná situace je znázorněna na obr. 34. Ztrátová impedance Z_S představuje odpor svorek, konektorů a pájených spojů.



Obr. 34 Schéma zapojení při měření ztrátové impedance Z_S [8]



Obr. 35 Znázornění umístění speciální kalibrační elektrody s izolační krytkou [8]

Hodnoty rozptylové admitance 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 zkušebního vzorku Z_{VZ} , obsažena i rozptylová admitance Y_0 a ztrátová impedance Z_S . Velikost změřené impedance vyjadřuje rovnice [9]:

$$Z_m = Z_S + \frac{\frac{1}{Y_0} Z_{VZ}}{\frac{1}{Y_0} + Z_{VZ}} \quad (53)$$

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

$$Z_m = \frac{\frac{1}{Y_0} (Z_m - Z_S)}{Z_S - Z_m + \frac{1}{Y_0}} = \frac{Z_m - Z_S}{1 + (Z_S - Z_m) Y_0} \quad (54)$$

2.2.2 LCR metr Agilent E4285A

Složky komplexní permitivity byly v kmitočtové závislosti 75 kHz až 30 MHz měřeny přesným LCR metrem firmy Agilent E4285A (obr. 36) ve spojení s tříelektrodovým systémem firmy Agilent 16451B (obr. 44).



Obr. 36 LCR metr Agilent 4285A [30]

2.2.3 Vysokonapěťový pulzní zdroj

Pro pulzní namáhání byl použit vysokonapěťový pulzní zdroj Foton HVGP0905P. Slouží ke generování pulzního vysokého napětí pro laboratorní účely. Výstupní VN pulz je obdélníkový. Nastavitelnými parametry jsou amplituda pulzu, jeho délka a repetiční frekvence. Časové parametry jsou měřitelné na pomocném výstupu zapojeném k osciloskopu, kde se objevuje signál se stejnou frekvencí a střídou, jako má výstupní signál. Nastavení parametrů (amplituda, frekvence a délka pulzu) je zajištěno pomocí víceotáčkových potenciometrů. Výstup je unipolární [26].

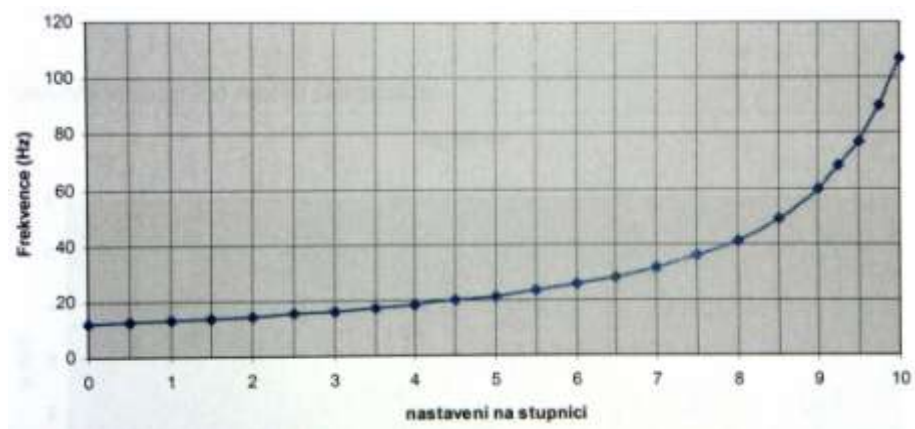


Obr. 37 Vysokonapěťový pulzní zdroj HVGP0905P

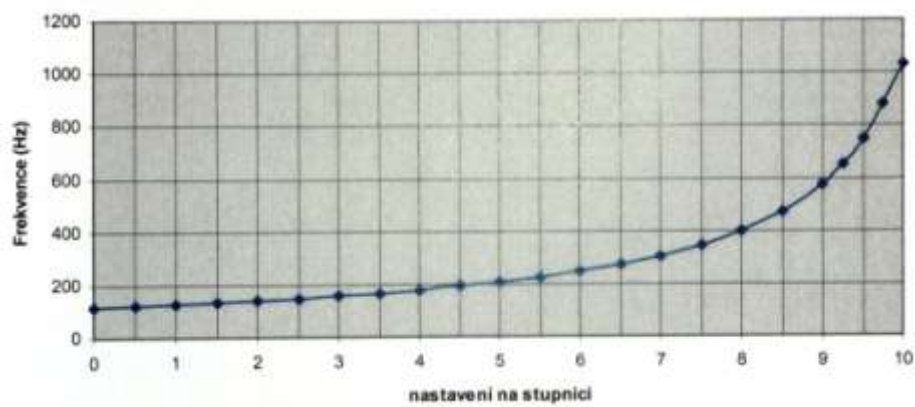
Tab. 6 Základní technické parametry vysokonapěťového pulzního zdroje [26]

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota
rozsah výstupního napětí	kV	1 ÷ 5
nastavení frekvence	Hz	10 ÷ 1000
nastavení střídý		1:10 ÷ 10:1
unipolární výstup (VN)		BNC SHV
monitorovací výstup		BNC, 12V

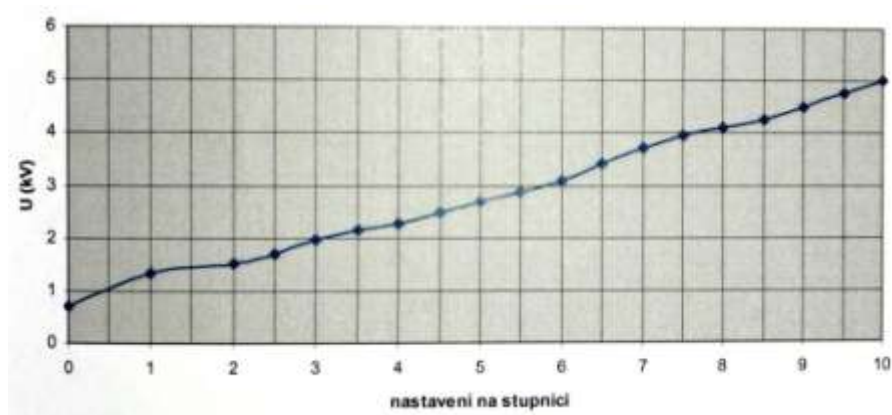
Nastavení parametrů pomocí ovládacích prvků



Obr. 38 Nastavení frekvence 1x



Obr. 39 Nastavení frekvence 10x



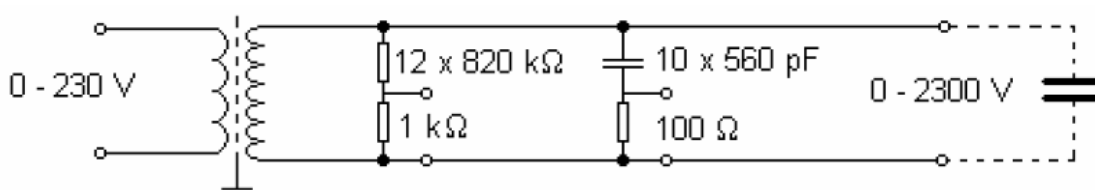
Obr. 40 Nastavení výstupního napětí (amplituda)

Tab. 7 Nastavení střídavy (pulse ratio)

číselník	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10
střída	1:10	2:8	3:7	4:6	1:1	6:4	7:3	8:2	10:1	20:1

2.2.4 Vysokonapěťový zdroj

Zdroj vysokého napětí pro realizaci elektrického namáhání konstantním napětím byl vyroben na ústavu elektrotechnologie. Hlavní součástí tohoto zdroje je vysokonapěťový transformátor se vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu. Tento transformátor byl zvolen pro svou odolnost proti přetížení a přeskokům. Údaje opsané ze štítku transformátoru jsou $U_P = 220 \text{ V}$, $U_S \approx 2300 \text{ V}$ a příkon 1440 VA. Na sekundární vinutí transformátoru je připojen odporový a kapacitní dělič.



Obr. 41 Schéma vysokonapěťového zdroje

Odporový dělič slouží pro sledování velikosti a časového průběhu výstupního napětí. Dělič byl navržen s ohledem na možnost sledování výstupního napětí na osciloskopu v poměru blízkém se 1:1000. Výstupní napětí děliče se tedy pohybuje od 0 V do 2,3 V. Skládá se z dvanácti rezistorů o jmenovitém odporu 820 kΩ a jednoho rezistoru 10 kΩ, na který je připojen přes stíněný kabel BNC konektor, označený nápisem „*Odporový dělič*“. Vypočtený poměr by se měl co nejvíce blížit zvolenému poměru:

$$R = \frac{1 \cdot 10 \cdot 10^3}{12 \cdot 820 \cdot 10^3} = \frac{10 \cdot 10^3}{9840 \cdot 10^3} \approx 1:984 \quad (55)$$

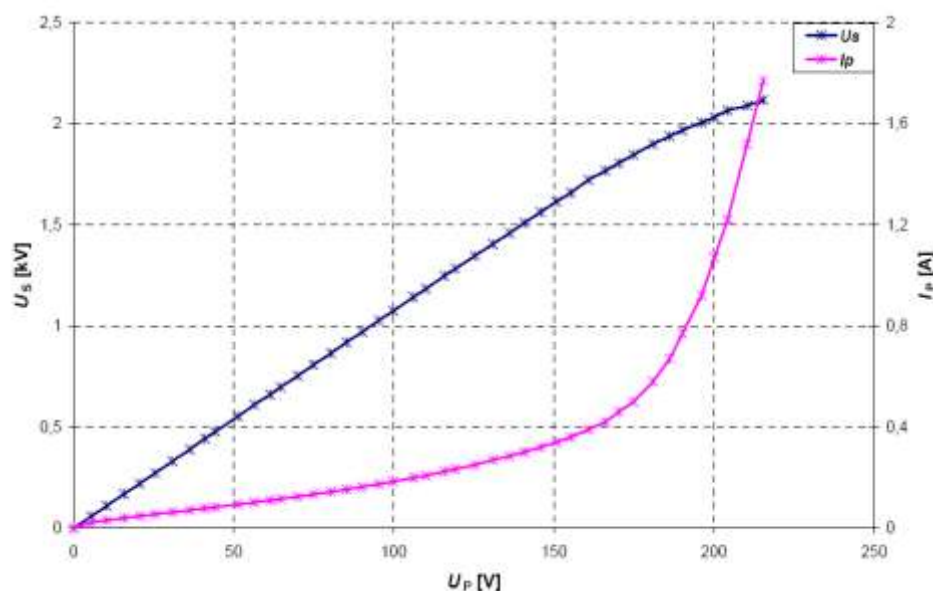
Pro přesné určení výsledného poměru byl odporový dělič změřen a určen výchozí poměr pro přepočet:

$$R = \frac{9,95 \cdot 10^3}{9,87 \cdot 10^3} \approx 1:992 \quad (56)$$

Napětí naměřené na výstupu odporového děliče a vynásobené koeficientem 992 udává skutečnou velikost výstupního napětí zdroje vysokého napětí. Celkovou změřenou převodní napěťovou charakteristiku zdroje vysokého napětí uvádí obr. 42.

Kapacitní dělič slouží pro sledování možných přeskoků a výbojů v dutinkách aj. Skládá se z deseti keramických kondenzátorů o jmenovité kapacitě 560 pF (výsledná kapacita 56 pF) a rezistoru o hodnotě 100 Ω , na který byl stíněným kabelem připojen BNC konektor, označený nápisem „Kapacitní dělič“.

Transformátor i oba děliče jsou umístěny v kovové kleci o rozměrech 200 x 200 x 300 mm (š, v, h) vyrobeného z čtvercového profilu 20 x 20 mm. Tato klec byla na několika místech spojena s ochranným vodičem, jedná se tedy o zařízení třídy ochrany I. Stěny byly zhotoveny z průhledného polymethylmetakrylátu (PMMA). V bočních stěnách byly vyvrtány větrací otvory o průměru 4 mm. Na přední straně jsou vyvedeny dva BNC konektory z kapacitního a odporového děliče, na zadní straně se nachází vývody vysokého napětí s krytím IP3X (chráněno před dotykem nástrojem), napájecí kabel, větrák pro aktivní chlazení zdroje a konektor pro napájení větráku. Krytí zdroje je z horní a přední strany IP4X a z ostatních stran vyhovuje předepsanému krytí IP2X [28].



Obr. 42: Změřená závislost vstupního proudu I_p , výstupního napětí U_s na vstupním napětí U_P [28]

2.2.5 Regulovatelný zdroj Diametral

Pro regulaci výstupního napětí, resp. intenzity elektrického pole, byl použit procesorem řízený regulovatelný zdroj střídavého napětí Diametral AC250K1D. Rozsah výstupního napětí tohoto zdroje je 0 V až 255 V, při maximálním výstupním proudu 1 A. Stabilita výstupního napětí a výstupní frekvence je závislá na stabilitě napájecí sítě. Výstupní napětí se získává transformací síťového napětí 230 V/50 Hz odděleným transformátorem. Díky tomu má výstupní napětí čistý sinusový průběh 50 Hz. Minimální změna napětí je 1 V. Ovládání zdroje se provádí pomocí numerické klávesnice umístěné na čelním panelu přístroje nebo pomocí osobního počítače. Nastavená a změřená hodnota napětí se zobrazuje na samostatných třímístných displejích LED.

Přesnost nastaveného napětí je 2,5 % z rozsahu, přístroj je na výstupu vybaven pojistkou proti zkratu F250V/1,25A, kterou byl chráněn i dále zapojený vysokonapěťový zdroj proti zkratům [28].



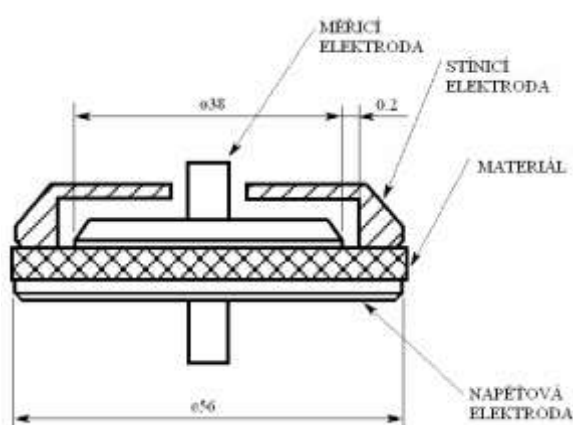
Obr. 43 Střídavý zdroj Diametral AC250K1D

2.2.6 Tříelektrodový systém

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

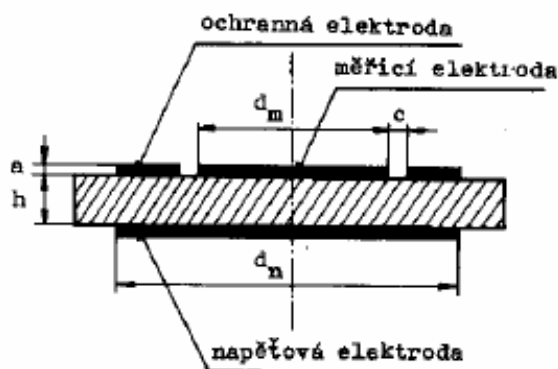


Obr. 44 Tříelektrodivý systém 16451B [8]



Obr. 45 Řez tříelektrodivým měřícím systémem [8]

Daný elektrodový 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. Tříelektrodivý 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. 46 [9].



Obr. 46 Tříelektrodový 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:

$$\varepsilon'_{(r)} = \frac{C_p}{C_0}, \quad (57)$$

kde 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 tříelektrodového systému je:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h}, \quad (58)$$

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

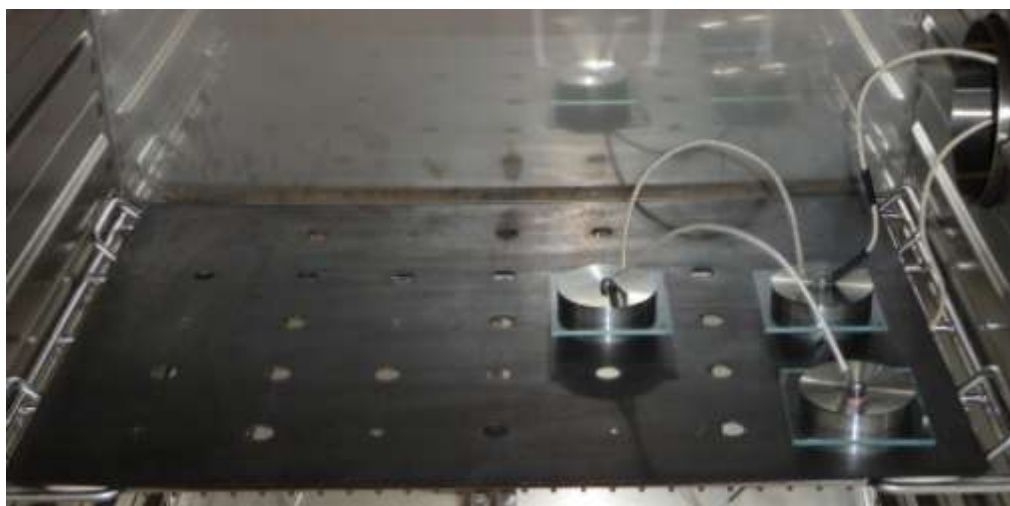
$$S_{ef} = \pi \frac{(d_m + B c)^2}{4}, \quad (59)$$

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

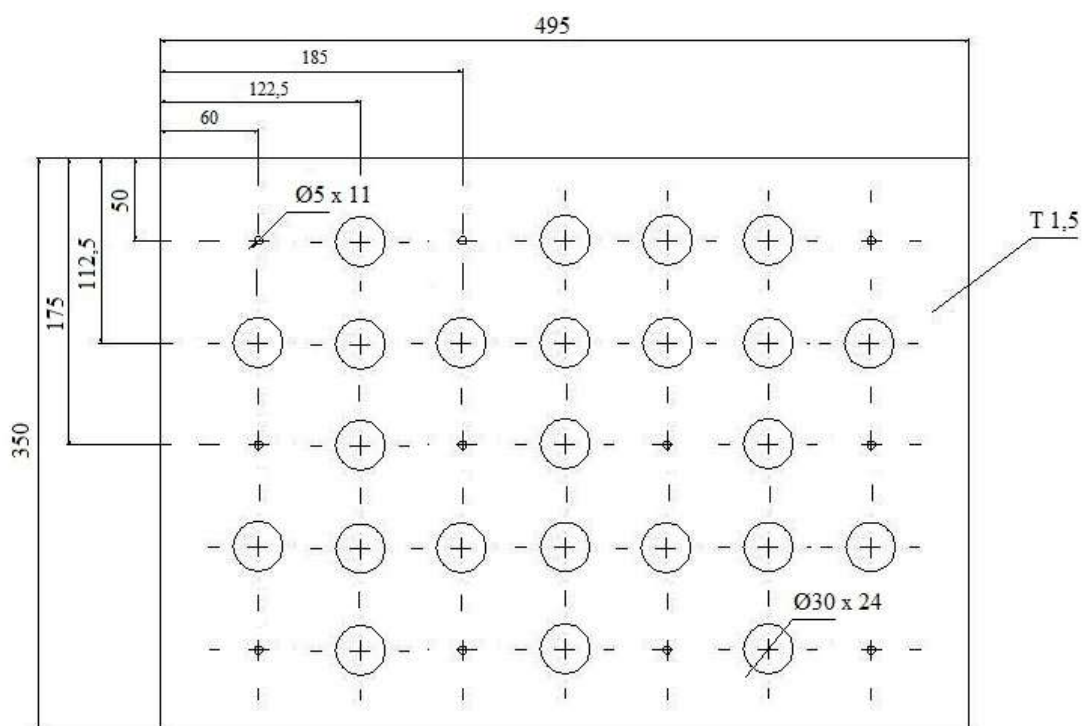
$$B = 1 - 2,932 \frac{h}{c} \log \cos \left(0,7854 \frac{c}{h} \right) \quad (60)$$

2.2.7 Dvouelektrodový systém

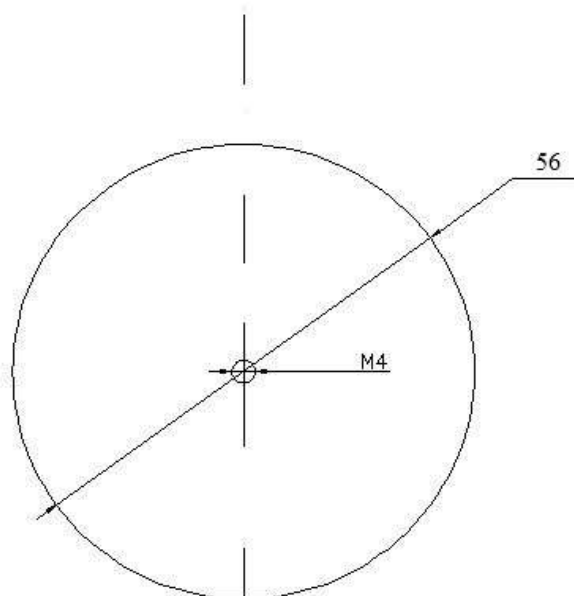
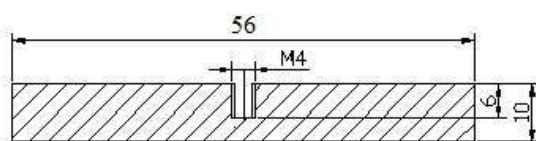
Vysokonapěťový pulzní zdroj je připojen k elektrodovému systému, který je složen ze dvou elektrod. Elektrody jsou vyrobeny z ušlechtilé legované nerezové oceli DIN 1.4301+1X (X5CrNi18-10). Tento materiál byl použit z důvodu dostatečné odolnosti proti korozi. Průměr každé z elektrod je 56 mm. Z této oceli bylo vyrobeno celkově 12 elektrod, tedy 6 elektrodových systémů. Rozměry jedné elektrody, včetně závitů uprostřed, jsou znázorněny na obr. 49. Plochy přiléhající na vzorek byly u všech elektrod vyleštěny. Kovový plát, na kterém byly umístěny všechny dvouelektrodové systémy, byl vyroben na ústavu elektrotechnologie a je znázorněn na obr. 48 včetně jeho tloušťky, všech rozměrů a rozměrů vyvrtaných děr pro uchycení elektrod a děr pro proudění vzduchu při ohřívání v klimatické komoře.



Obr. 47 Dvouelektrodový systém se zkušebními vzorky umístěný v klimatické komoře



Obr. 48 Kovová deska pro uchycení dvouelektrodových systémů [mm]



Obr. 49 Náskres elektrody [mm]

2.2.8 Klimatická komora SteriCell

Pro realizaci pulzního a konstantního namáhání byla použita komora SteriCell 111 od firmy BTM Medical Technology s.r.o. Komora slouží obecně k rovnoměrnému temperování různých druhů materiálů pomocí horkého vzduchu při nastavitelné teplotě a volitelném časovém režimu. Průběh teploty je řízen mikroprocesorem s digitálním displejem a teplotním čidlem Pt 100. Rozměry vnitřních prostorů jsou šířka 540 x 390 x 530 mm (š, h, v). Pracovní teplota je garantována od 10 °C nad okolní teplotou, maximální teplota je 250 °C. Prostorovou odchylku teploty udává výrobce v rozmezí -1 °C až $+5$ °C, časovou odchylku teploty -1 °C až $+3$ °C [29].

2.2.9 Měření rezistivity

Pro stanovení absorpčních charakteristik a vnitřní rezistivity u vzorků tloušťky 2 mm a 3 mm byl použit elektrometr Keithley 6517A (znázorněn na obr. 50), který se vyznačuje velkou citlivostí a přesností. Je vybaven mnoha funkcemi, které zjednodušují měření vysoké impedance a rezistivity izolačních materiálů. Má nízkoproudový vstupní zesilovač se vstupním klidovým proudem do 3 fA. Vstupní impedance pro měření napětí a rezistivity je 200 T Ω [24].



Obr. 50 Elektrometr Keithley 6517A

V zapojení s elektrometrem byl použit tříelektrodový měřicí systém Keithley 8009 Rezistivity Test Fixture (obr. 51). Měřicí systém má dvě elektrody kruhového tvaru, kde vrchní elektroda je napěťová a spodní elektroda je vybavena měřicí a ochrannou elektrodou [25].



Obr. 51 Elektroodový měřicí systém Keithley 8009

Pro zjištění nabíjecího a vybíjecího proudu pro vzorky tloušťky 6 mm a sadu vzorků 3 mm namáhaných konstantním napětím byl použit měřicí přístroj 4339B High – Resistance Meter od společnosti Agilent Technologies. Měřicí přístroj je pro ukázkou zobrazen na obr. 52.



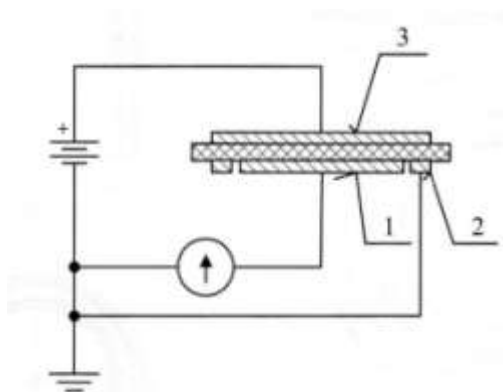
Obr. 52 Měřicí přístroj Agilent 4339B

Tento měřicí přístroj byl během měření připojen k tříelektrodovému měřicímu systému 16008B Resistivity Cell. Tříelektrodový systém obsahuje měřicí, napěťovou a ochranou elektrodu a slouží pro umístění měřeného vzorku.

Celý takto zapojený systém je připojen pomocí kabelu do brány LAN, která slouží pro připojení k počítačové síti. Komunikace s počítačem probíhá pomocí UTP kabelu. V PC se nachází ovládací software, jedná se konkrétně o program VEE Pro od Společnosti Agilent Technologies. V tomto softwaru je možné programovat nastavení měření a určit výstup do programu Microsoft Office Excel. Výsledkem měření je Excelovský soubor obsahující naměřené charakteristiky vybíjecího a nabíjecího proudu. Kompletní měřicí systém je znázorněn na obr. 53.



Obr. 53 Elektroodovým systémem Agilent 16008B



Obr. 54 Zapojení pro měření vnitřního odporu

1 – měřicí elektroda, 2 – ochranná elektroda, 3 – napěťová elektroda

Naměřené hodnoty nabíjecích a vybíjecích proudů v závislosti na čase, pomocí programu Agilent Vee Pro, jsou ukládány přímo do tabulkového procesoru Microsoft Excel, kde se poté dopočítá rezistivita podle vztahu

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \frac{\pi (d_1 + g)^2}{4h}, \quad (60)$$

kde $U = 500 \text{ V}$, h je tloušťka vzorku, I je změřený proud, měřicí systém Keithley 8009: $D_0 = 54 \text{ mm}$ a $g = 3,175 \text{ mm}$, měřicí systém Agilent 16008B: $D_0 = 50 \text{ mm}$ a $g = 10 \text{ mm}$.

2.2.10 Použité počítačové programy

Pro komunikaci měřicích přístrojů s počítačem byl použit program Agilent VeePro. Tento program umožňuje načtení a přidání libovolného měřicího přístroje. Pomocí schematických bloků a různých prvků tohoto programu, je možné vytvořit si vlastní program pro ovládání měřicího pracoviště. Díky tomu je možné měření alespoň z části automatizovat. Velkou výhodou programu VeePro je jeho možnost propojení například s programem Microsoft Excel. Grafické programové prostředí Agilent VeePro ukládá naměřená data – hodnoty měřených veličin přímo do tabulkového procesoru Microsoft Excel.

Rovněž velkou výhodou programu VeePro je možnost nastavení komunikace s přístrojem přes protokol TCP/IP, což umožňuje připojit potřebný přístroj k jakémukoli PC v laboratoři přes síť. Programy pro měření střídavých a stejnosměrných veličin a ukázka měřicích prostředí jsou umístěny na přiloženém CD.

2.3 Postup měření

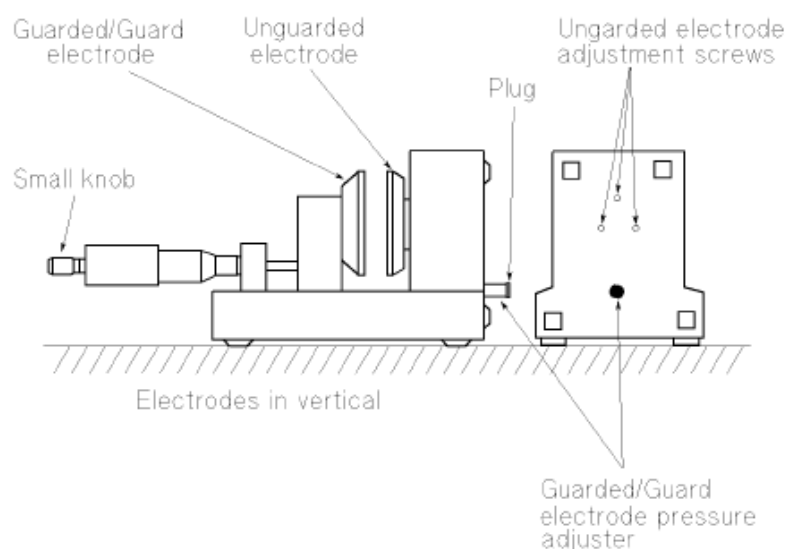
Pro experiment bylo použito celkem 18 vzorků materiálu QUINN PS o rozměrech 74 x 70 mm a tloušťce 2 mm, 3 mm a 6 mm. Byly použity tři sady po šesti kusech vzorků s vlastním značením 1 až 6. Pro elektrické namáhání byly přednostně vybrány vzorky o tloušťce 3 mm, které byly rozděleny na dvě sady, přičemž každá obsahuje tři vzorky. Označení vzorků bylo zvoleno podle způsobu namáhání, kterému byly vystaveny (P – pulzní, K – konstantním napětím).

Před samotným experimentem byly vzorky vždy předkondicionovány v exsikátoru s nastavenou relativní vlhkostí po dobu minimálně čtyř dnů. Vzorky byly ponechány v exsikátoru s relativní vlhkostí 55 %, která byla dosažena vytvořením nasyceného roztoku dusičnanu hořečnatého $(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. Vzorky byly do exsikátoru vkládány taktéž mezi jednotlivými měřeními.

Při **střídavém měření** byly posuzovány hodnoty parazitní kapacity a ztrátového činitele vzorků a následovně pak vypočítané složky komplexní permitivity. Měření každého vzorku bylo opakováno šestkrát pro všechny tloušťky. Poté byly výsledky statisticky vyhodnoceny. Vzorky byly proměřovány LCR metrem Agilent E4980A pro frekvence 20 Hz až 2 MHz a LCR metrem Agilent E4285A pro frekvence 75 kHz až 30 MHz propojenými s výše popsaným tříelektrodovým systémem Agilent 16451B. Přístroje 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 příčnou hodnotu kapacity C_p



Obr. 55 Vertikální poloha a elektrodové šrouby pro seřízení [8]

Stejnoseměrné měření pro tloušťky 2 mm a 3 mm bylo realizováno pomocí elektrometru Keithley 6517A s tříelektrodovým měřicím systémem Keithley 8009. Do této měřicí komory lze umístit vzorky o průměru 64 – 102 mm a tloušťky maximálně 3,2 mm, z tohoto důvodu byly vzorky tloušťky 6 mm proměřovány na druhém elektrodovém systému Agilent 16008B (obr. 53). Pro vzorky tloušťky 6 mm a sadu vzorků tloušťky 3 mm vystavenou konstantnímu namáhání byl použit přístroj Agilent 4339B s tříelektrodovým měřicím systémem Agilent 16008B. Zatížení vzorků bylo realizováno hmotností 5 kg.

Všechny vzorky byly měřeny při napětí 500 V po dobu sedmi hodin, přičemž 3,5 hodiny trvalo nabíjení a 3,5 hodiny vybíjení vzorku. Stárnuté vzorky pak byly proměřeny v kratším čase dvou hodin, kde 1 hodinu trvalo nabíjení a 1 hodinu vybíjení vzorku. Byly snímány nabíjecí a vybíjecí proudy v závislosti na čase. Následně byla stanovena rezistivita podle rovnice (60).

Pulzní namáhání bylo realizováno vysokonapěťovým pulzním zdrojem Foton HVGP0905P zapojeným ke dvouelektrodovému systému, který byl umístěn v komoře s ohledem na zamezení přístupu nebo dotyku. První sada vzorků (P1, P3, P5) byla namáhána napětím 3 kV s frekvencí 1 kHz a střídou 1:1. Podle grafických závislostí na obr. 39, obr. 40 a tab. 7 byly na ovládacích prvcích přístroje nastaveny hodnoty frekvence **9,88**; amplitudy **5,75** a střídý **4,72**. Druhá sada vzorků (K2, K4, K6) pak byla namáhána **konstantním napětím** 1,5 kV s frekvencí 50 Hz. Podle grafické závislosti na obr. 42 bylo na zdroji Diametral nastaveno vstupní napětí **143 V**, které odpovídá výstupnímu napětí 1,5 kV na vysokonapěťovém zdroji.

Po každých 100 hodinách namáhání byly sledovány frekvenční závislosti relativní permitivity a ztrátového čísla. Namáhání probíhalo při působení atmosférických podmínek okolního prostředí.

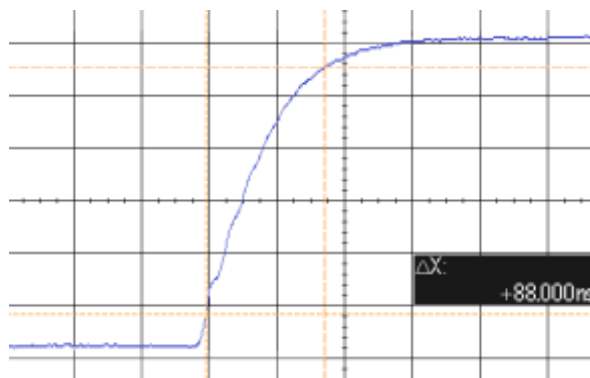
2.4 Výsledky experimentu

Výsledky složek komplexní permitivity v závislosti na kmitočtu při měření s korekcemi (OPEN, SHORT) byly pro zkušební deskové vzorky krystalického polystyrenu vyjádřeny grafickou formou pomocí závislostí $\varepsilon' = F(f)$, $\varepsilon'' = F(f)$, $\varepsilon'' = F(\varepsilon')$. Pro přehlednější zpracování jsou grafické závislosti naměřených výsledků uváděny ve frekvenčním rozsahu 10^3 Hz až 10^7 Hz, v nižších frekvencích jsou naměřené hodnoty zkresleny velkou impedancí.

Graficky jsou v diplomové práci předkládány výsledky, které mají největší vypovídací hodnotu o zkoumaných závislostech na experimentálních vzorcích. Mezi tyto patří:

- kmitočtové závislosti relativní permitivity, ztrátového čísla a Coleho-Coleho diagramy pro sady nestárnutých vzorků tloušťky 2, 3 a 6 mm a rozsah frekvencí 20 Hz až 2 MHz a 75 kHz až 30 MHz (obr. 57 až obr. 62)
- pro úplnost je na obr. 63 až obr. 65 zobrazena kmitočtová závislost relativní permitivity pro vybraný vzorek a všechny jeho tloušťky 2, 3 a 6 mm při měření pro frekvenční rozsahy 20 Hz až 2 MHz, 75 kHz až 30 MHz a jejich následná návaznost
- kmitočtová závislost relativní permitivity pro první sadu vzorků (P1, P3 a P5) vystavených pulznímu namáhání pro napětí 3 kV a frekvenci 1 kHz (obr. 66 a 67)
- kmitočtová závislost relativní permitivity pro druhou sadu vzorků (K2, K4 a K6) namáhaných konstantním napětím o velikosti 1,5 kV s frekvencí 50 Hz (obr. 68 a 69)

Na obr. 56 je znázorněna strmost napěťové hrany pulzu z vysokofrekvenčního zdroje. Vlivem unipolárního výstupu tohoto zdroje je hodnota náběžné hrany při napětí 3 kV a frekvenci 1 kHz rovna 88,0 ns, což odpovídá strmosti $34,1 \text{ kV } \mu\text{s}^{-1}$. Při nastavené střídě 1:1 pak šířka pulzu dosahuje hodnoty 500 μs .



Obr. 56 Strmost nárůstu napětí vysokofrekvenčního pulzního zdroje [13]

Při sledování materiálových vlastností vysokohustotního krystalického polystyrénu QUINN PS pomocí stejnosměrných elektrických metod byly zkoumány časové závislosti nabíjecích a vybíjecích proudů, z nichž byla posléze dopočítána vnitřní rezistivita daných vzorků (grafické závislosti $I_n = F(t)$, $I_v = F(t)$ a $\rho_v = F(t)$). Graficky jsou obdobně jako pro střídavé měření předkládány pouze výsledky, které mají největší vypovídací hodnotu o zkoumaných závislostech na experimentálních vzorcích. Mezi tyto patří:

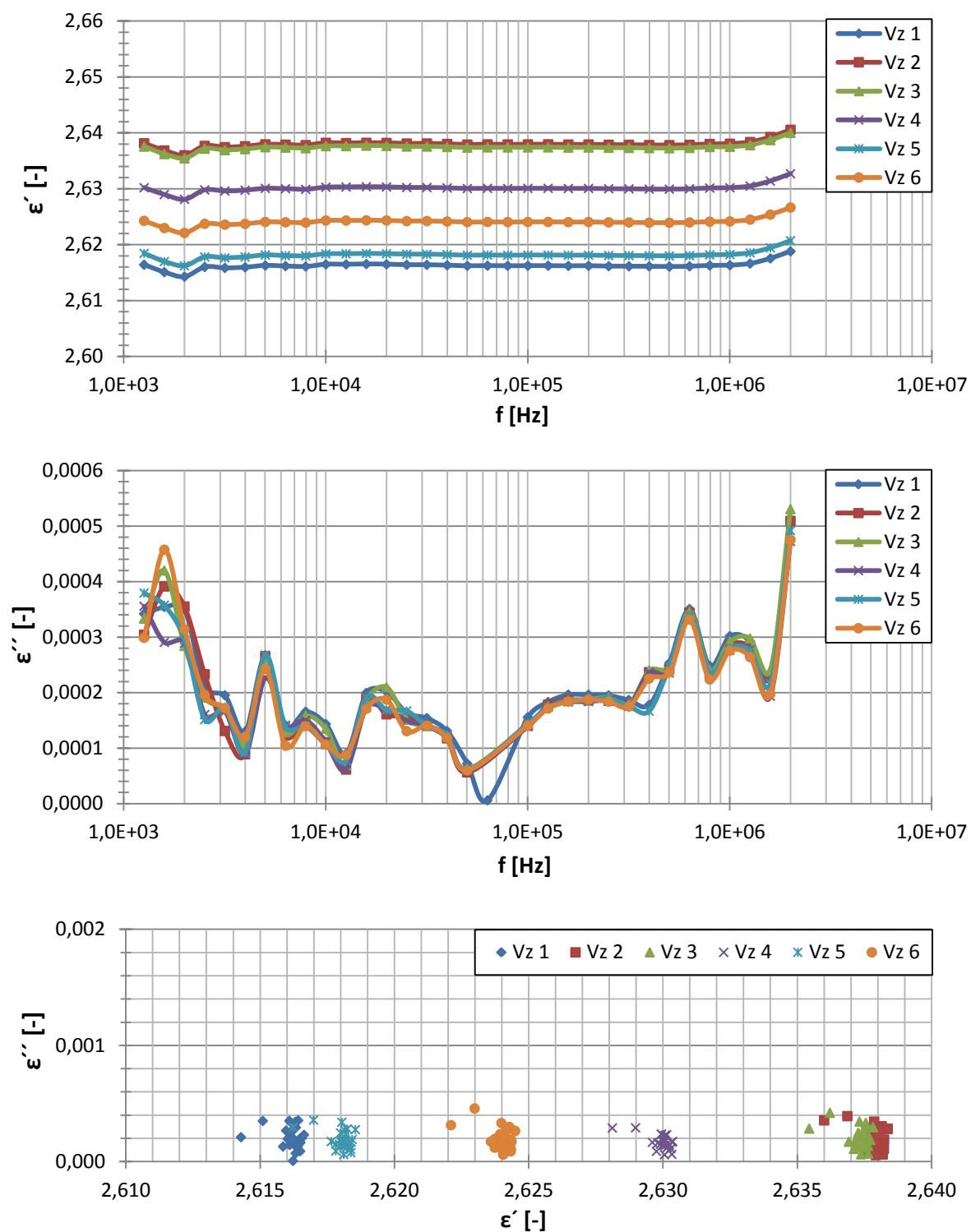
- časová závislost nabíjecích, vybíjecích proudů a měrného vnitřního odporu zvoleného nestárnutého vzorku pro tloušťku 2, 3 a 6 mm (obr. 70)
- závislosti $I_n = F(t)$, $I_v = F(t)$ a $\rho_v = F(t)$ pro druhou sadu vzorků o tloušťky 3 mm (obr. 71)
- časová závislost nabíjecích, vybíjecích proudů a měrného vnitřního odporu pro vzorek P1 vystavený pulznímu namáhání pro dobu namáhání 0 h a 500 h (obr. 72)
- časová závislost nabíjecích, vybíjecích proudů a měrného vnitřního odporu pro vzorek K2 vystavený pulznímu namáhání pro dobu namáhání 0 h a 500 h (obr. 73)

Zkušební vzorek vykazoval typické vlastnosti, které jsou charakteristické pro dielektrika relaxačního typu. Měření pomocí voltampérové metody ukazuje, že je možné měřit velmi malé proudy, které zkoumaným izolantem protékají, avšak velmi obtížně se měří a jsou velice často ovlivňovány okolím. Změny dielektrických vlastností zkoumaného materiálu s dobou stárnutí jako parametrem se projevují postupným nárůstem vodivostních proudů, přičemž pulzní namáhání má ve srovnání s namáháním konstantním napětím výrazně degradační účinky. Konstantním namáháním napětím 1,5 kV s frekvencí 50 Hz (obr. 72) ukazuje, že s dobou namáhání rezistivita klesá, a tím se zvětšuje vodivost analyzovaného materiálu. Naproti tomu při pulzní namáhání napětím 3kV s frekvencí 1 kHz (obr. 73) rezistivita nepatrně vzrostla, tzn. že materiál má menší vodivost. Je tedy zřejmé, že čím větší má vzorek z dielektrického materiálu rezistivitu, tím menší má vodivost a tím více je izolantem. Ze získaných grafických závislostí je na první pohled viditelné, že měření realizované pomocí elektrodového systému Agilent 16008B je daleko přesnější než měření elektrodovým systémem Keithley 8009.

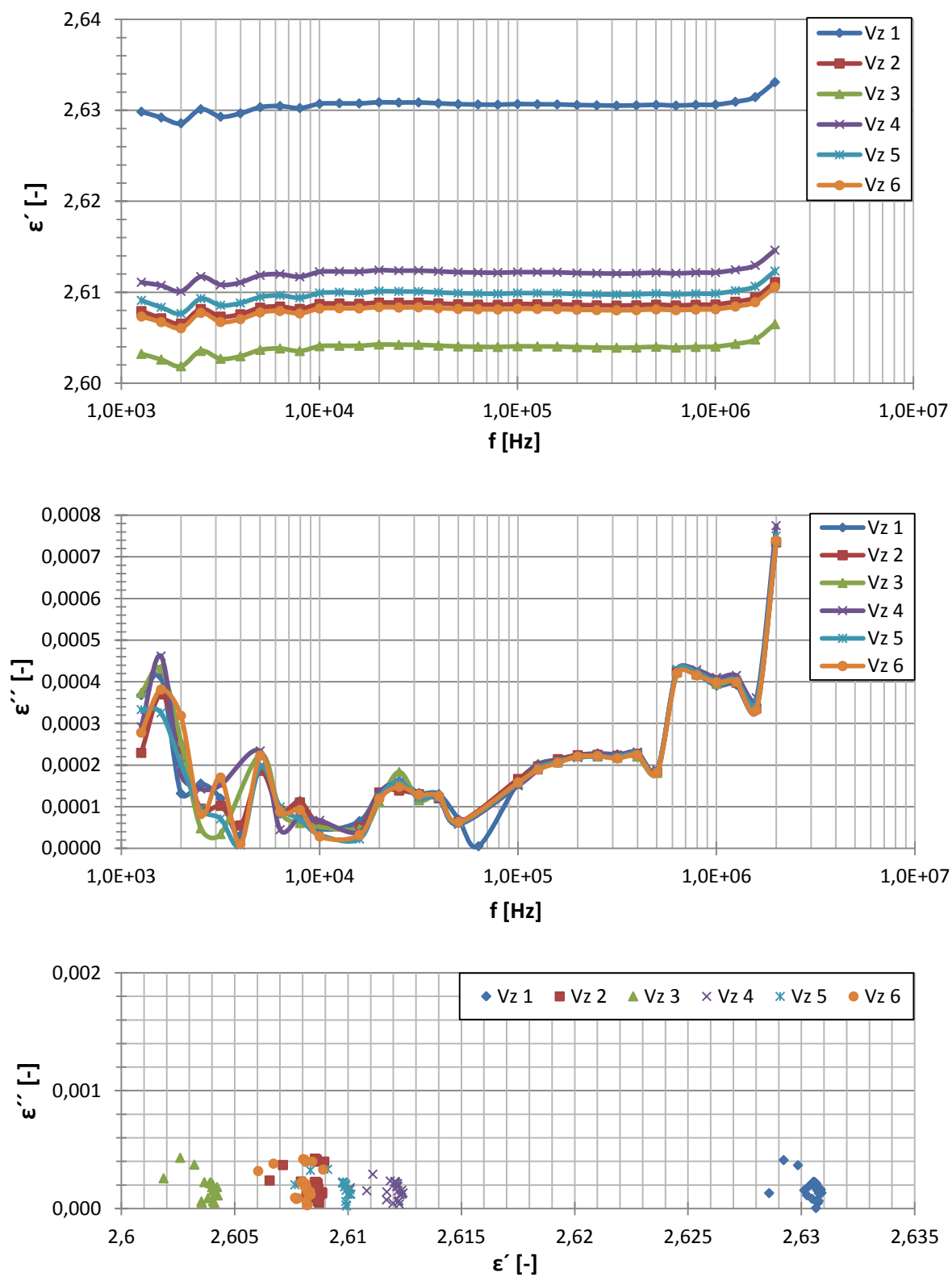
Měření dielektrických veličin ovlivňují různé činitele. Vzhledem k možnosti vniku vzduchových mezer mezi zkoumaným vzorkem a přiloženými elektrodami hraje roli skutečná tloušťka vzorku. Vzhledem k nehomogenně vzorku je nutné dodržovat neměnnou polohu celého elektrodového systému během experimentu. Každá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

Všechna experimentálně získaná data, byla zpracována tabelárně a graficky. Vzhledem k rozsahu práce a velkého počtu změřených hodnot byly pro posouzení experimentu vybrány pouze níže uvedené grafické závislosti. Údaje získané měřením jsou shrnuty v tabulkách a grafech, které jsou všechny uvedeny na přiloženém paměťovém médiu. Každé měření bylo provedeno šestkrát pro získání přesnějších hodnot, tj. eliminaci možných chyb měření. Pokud bychom chtěli dosáhnout ještě větší přesnosti pro střídavé 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. Celý experiment byl realizován v laboratořích FEKT VUT Brno a podmínky při veškerých měřeních jsou umístěny na paměťovém médiu v souboru MS Office Excel s názvem „*ukládání vzorků*“.

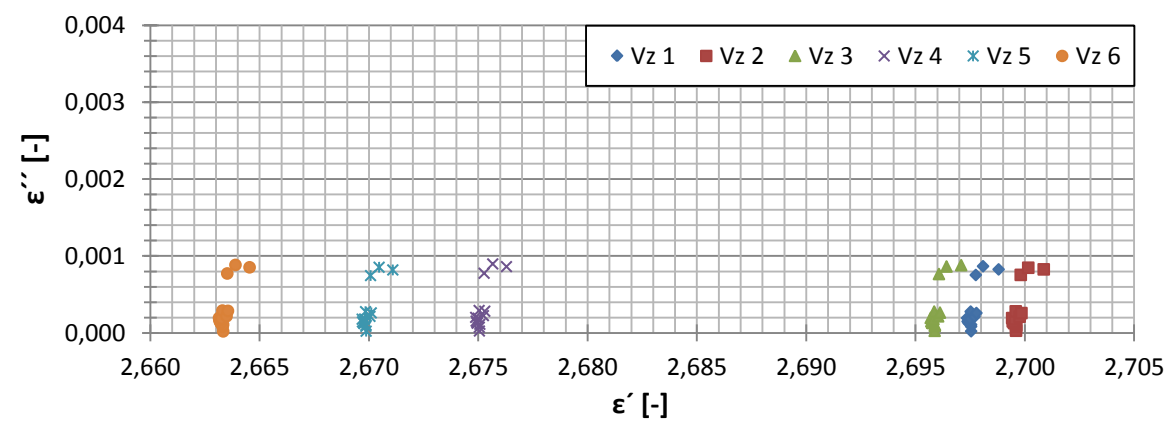
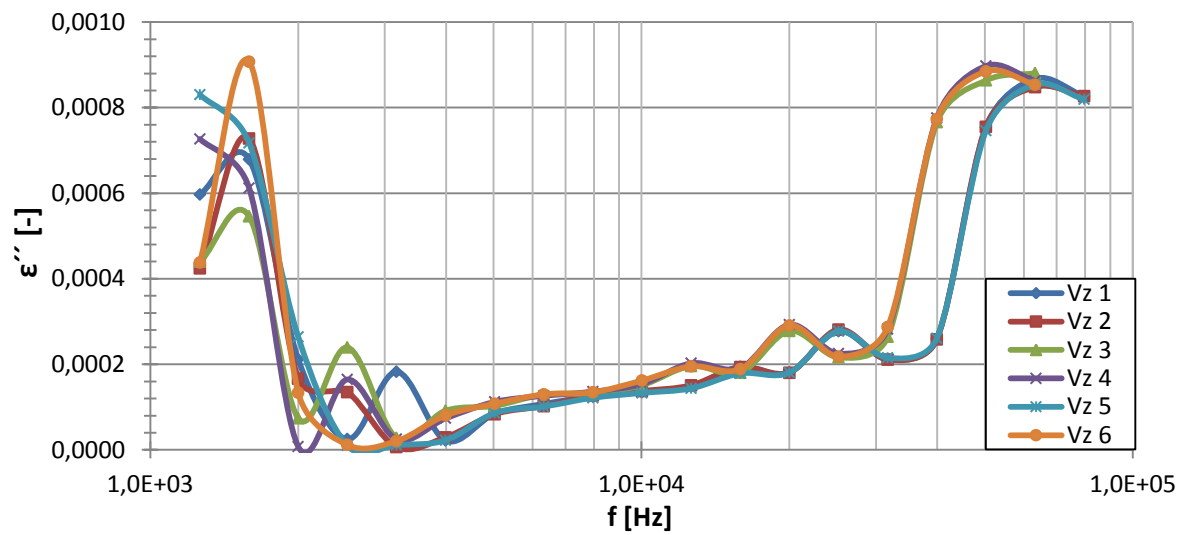
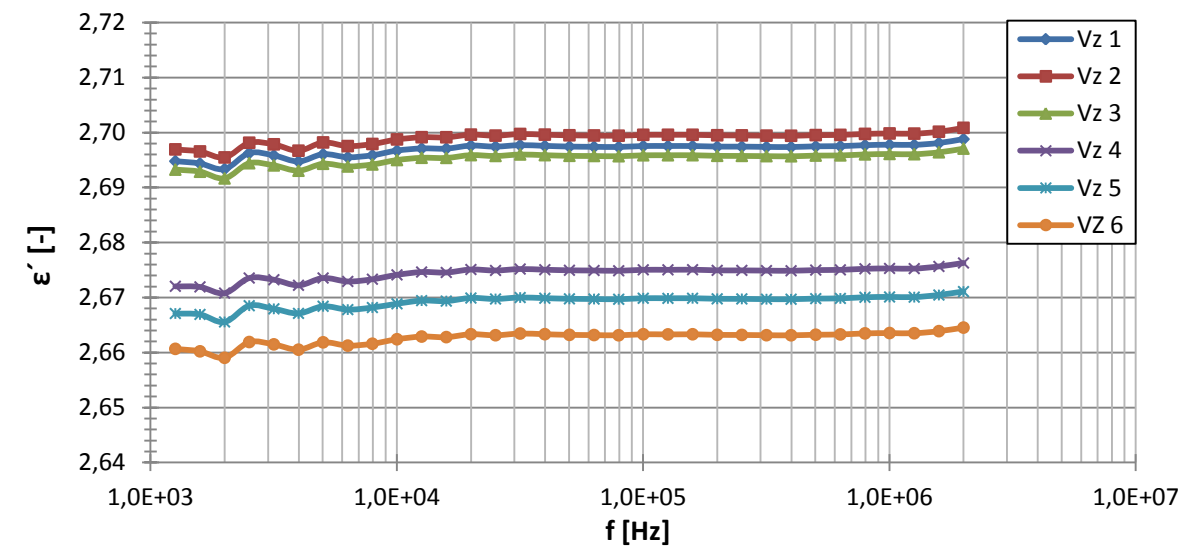
2.4.1 Střídavé měření



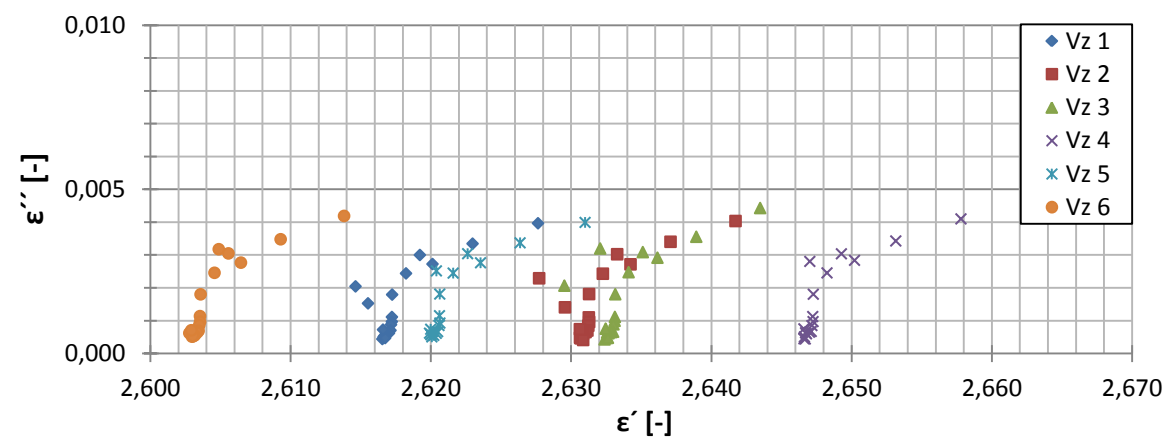
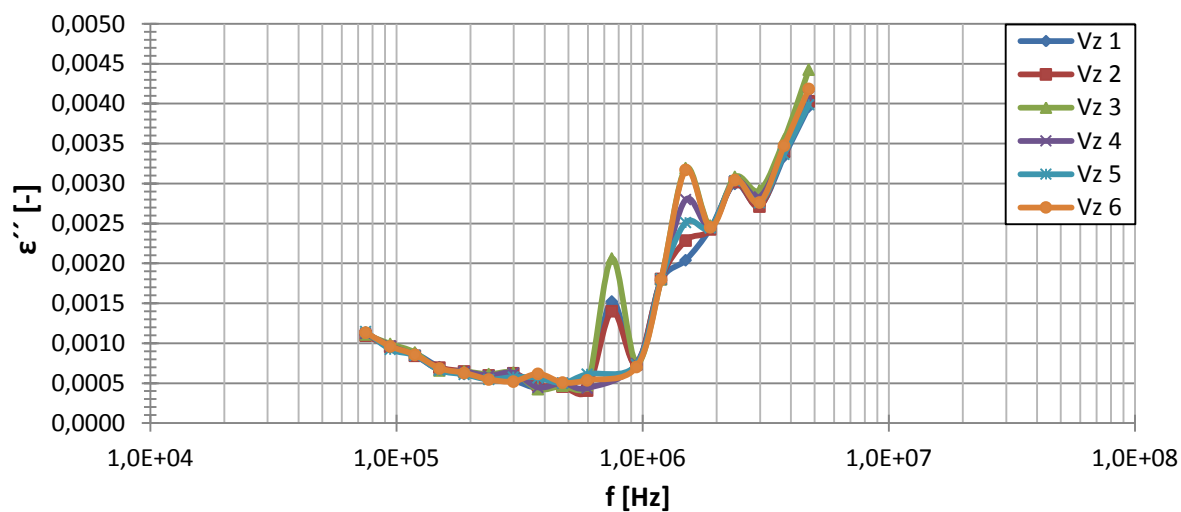
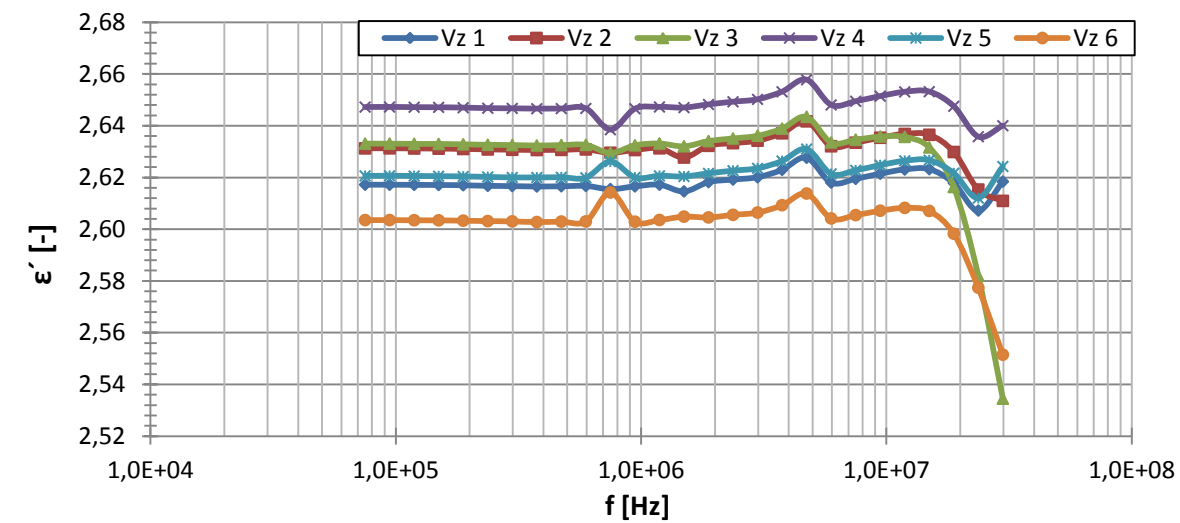
Obr. 57 Závislosti $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 2 \text{ mm}$ (frekvenční rozsah 20Hz – 2MHz)



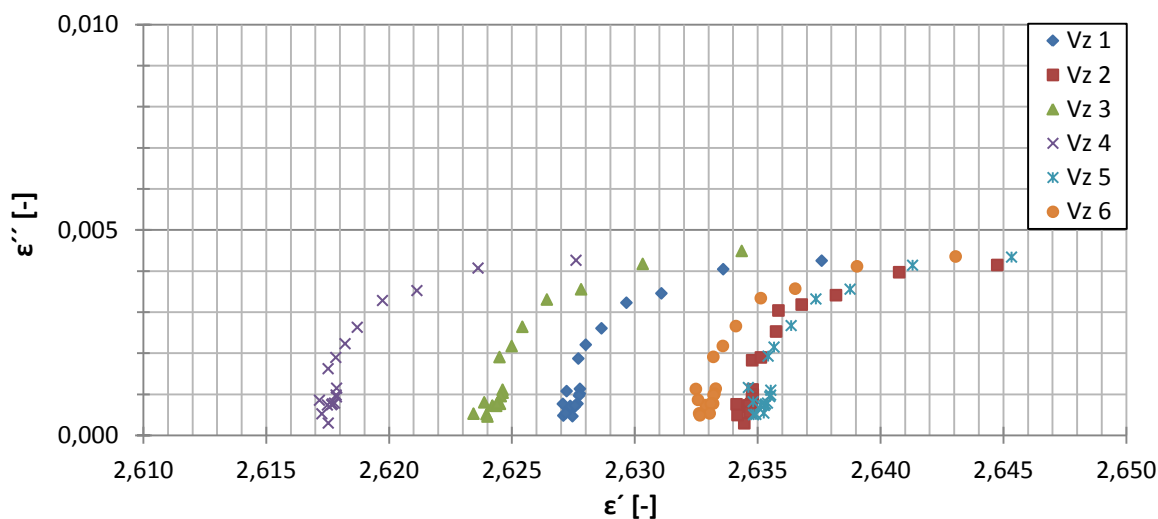
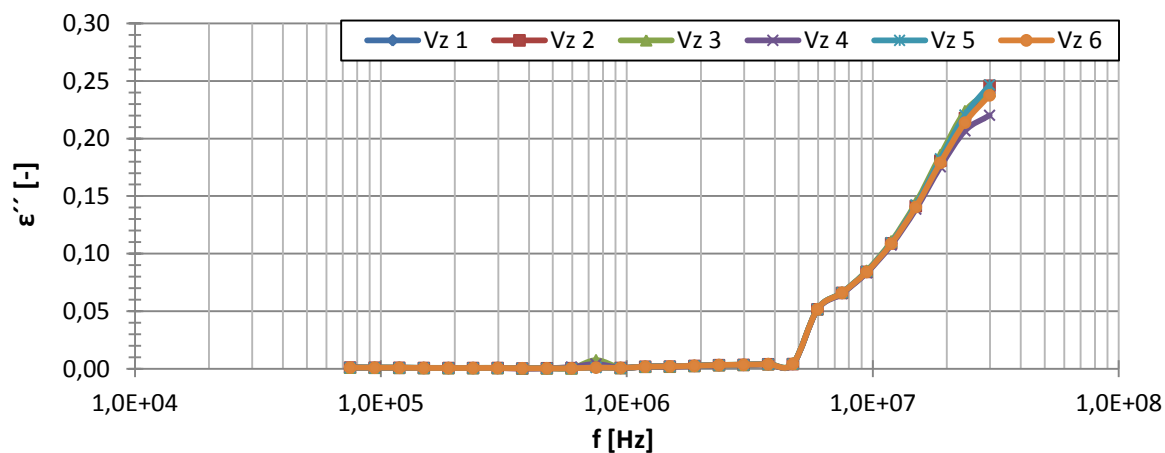
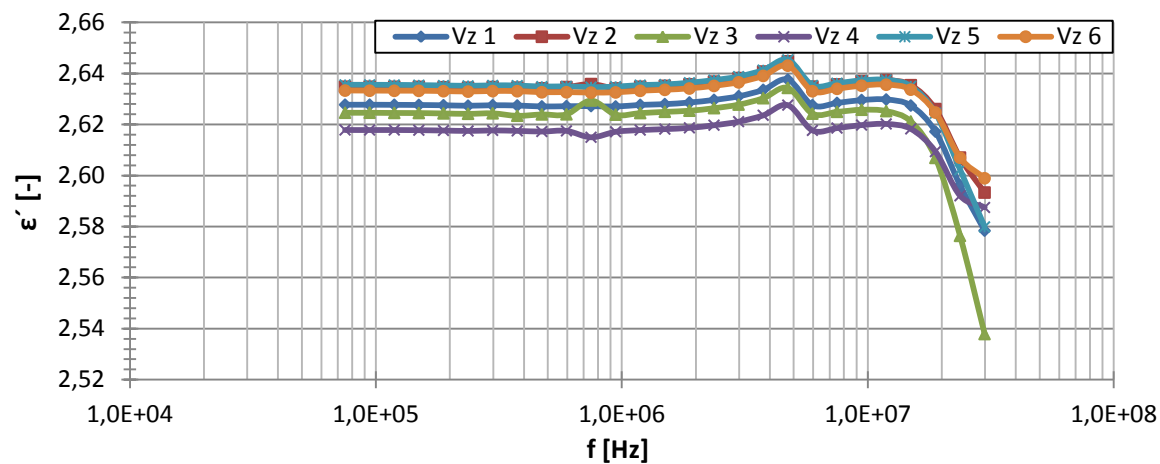
Obr. 58 Závislosti $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 3 \text{ mm}$ (frekvenční rozsah 20Hz – 2MHz)



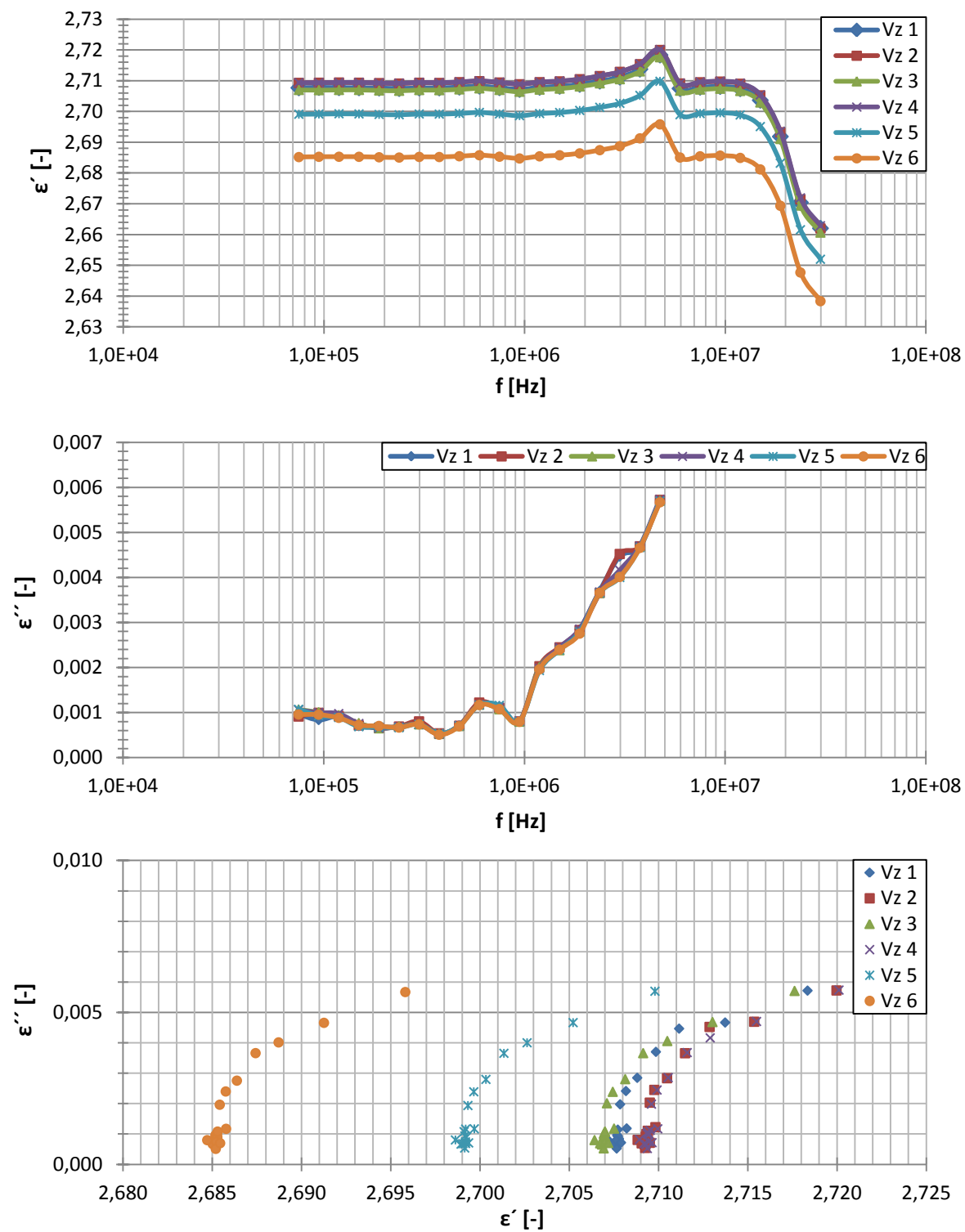
Obr. 59 Závislosti $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 6$ mm (frekvenční rozsah 20Hz – 2MHz)



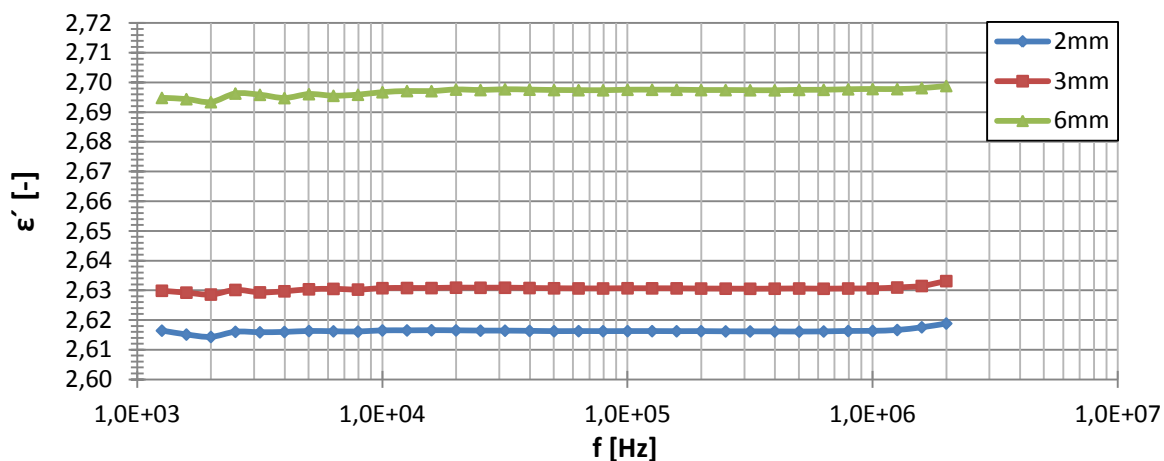
Obr. 60 Závislosti $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 2$ mm (frekvenční rozsah 75kHz – 30MHz)



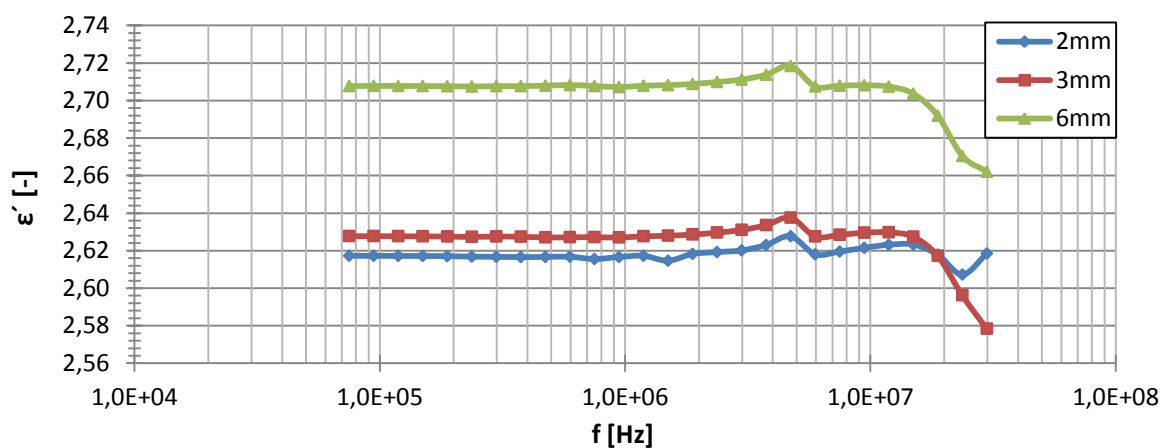
Obr. 61 Závislosti $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 3$ mm (frekvenční rozsah 75kHz – 30MHz)



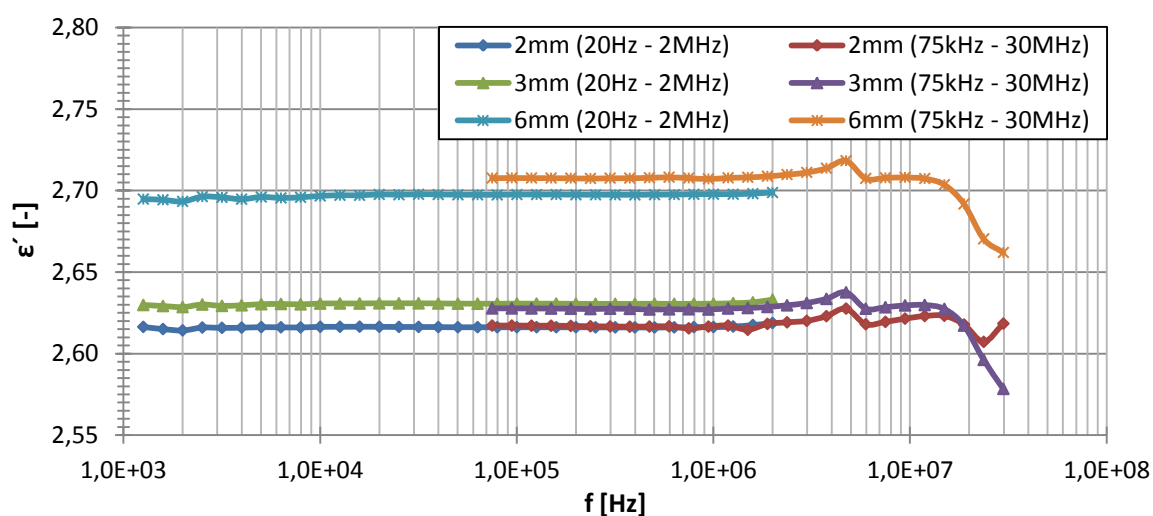
Obr. 62 Závislosti $\epsilon' = F(f)$, $\epsilon'' = F(f)$, $\epsilon'' = F(\epsilon')$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 6$ mm (frekvenční rozsah 75kHz – 30MHz)



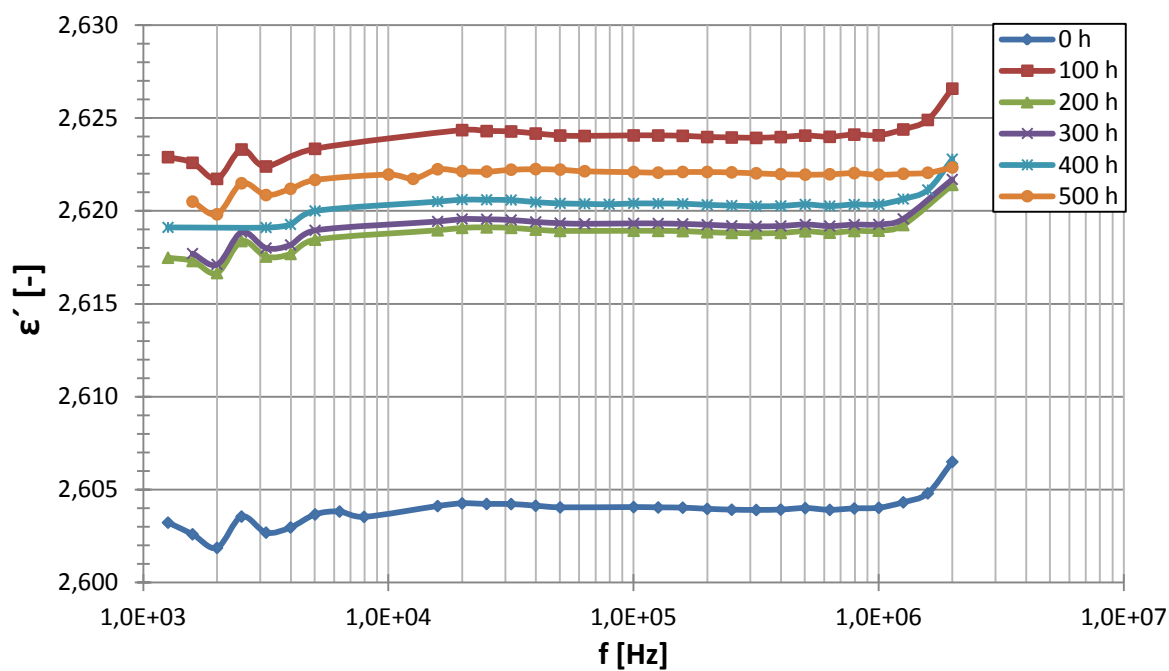
Obr. 63 Závislost $\epsilon' = F(f)$ vzorku č.1 pro tloušťku $h = 2, 3, 6$ mm (frekvenční rozsah 20Hz – 2MHz)



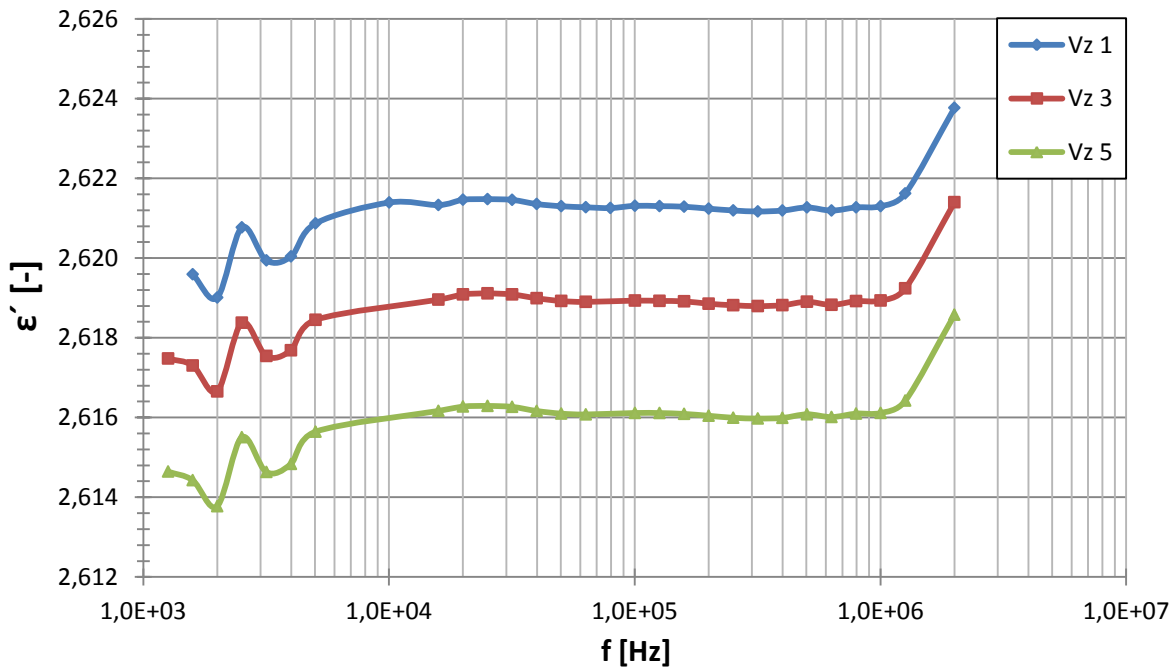
Obr. 64 Závislost $\epsilon' = F(f)$ vzorku č.1 pro tloušťku $h = 2, 3, 6$ mm (frekvenční rozsah 75kHz – 30MHz)



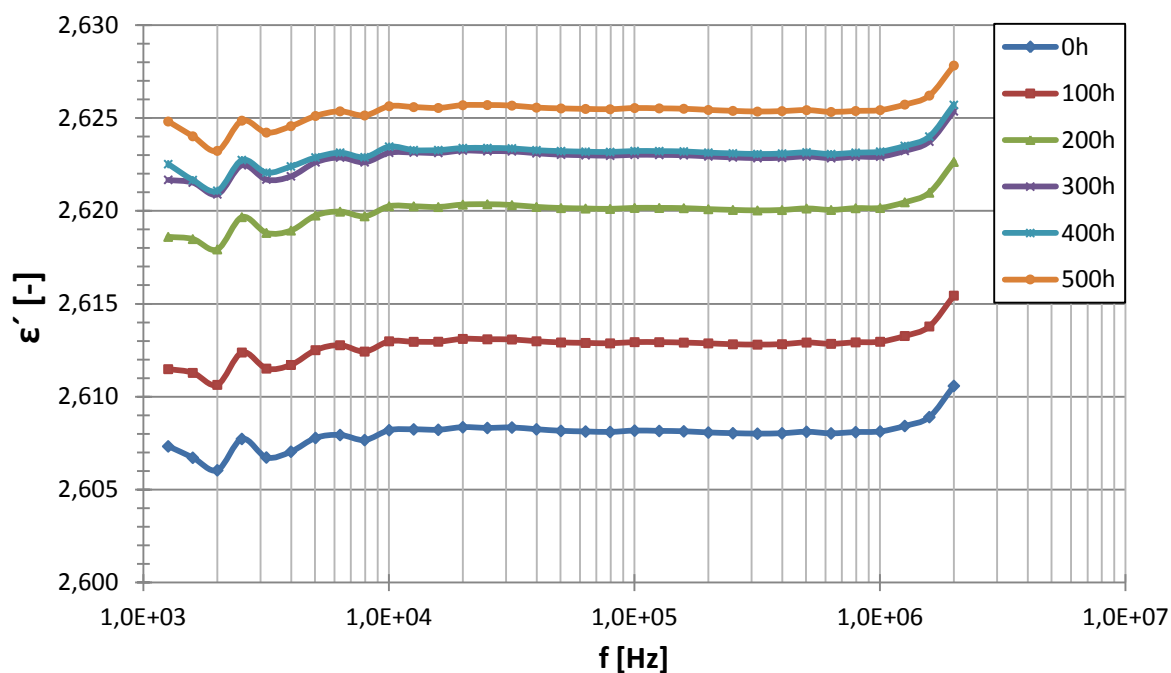
Obr. 65 Závislost $\epsilon' = F(f)$ vzorku č.1 pro tloušťku $h = 2, 3, 6$ mm a dva frekvenční rozsahy



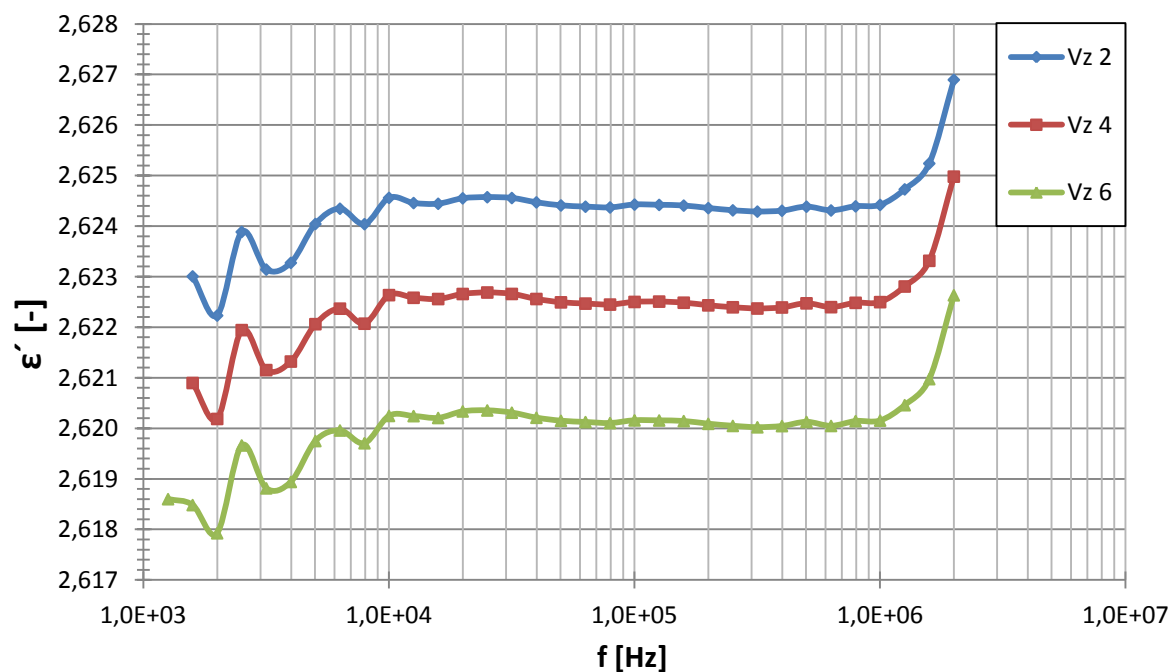
Obr. 66 Závislost pulzního namáhání $\epsilon' = F(f)$ vzorku č.3 pro napětí 3 kV a tloušťku $h = 3$ mm s parametrem doby namáhání při frekvenci 1 kHz



Obr. 67 Závislost pulzního namáhání $\epsilon' = F(f)$ po době namáhání 200 h pro napětí 3 kV a tloušťku vzorku $h = 3$ mm při frekvenci 1 kHz

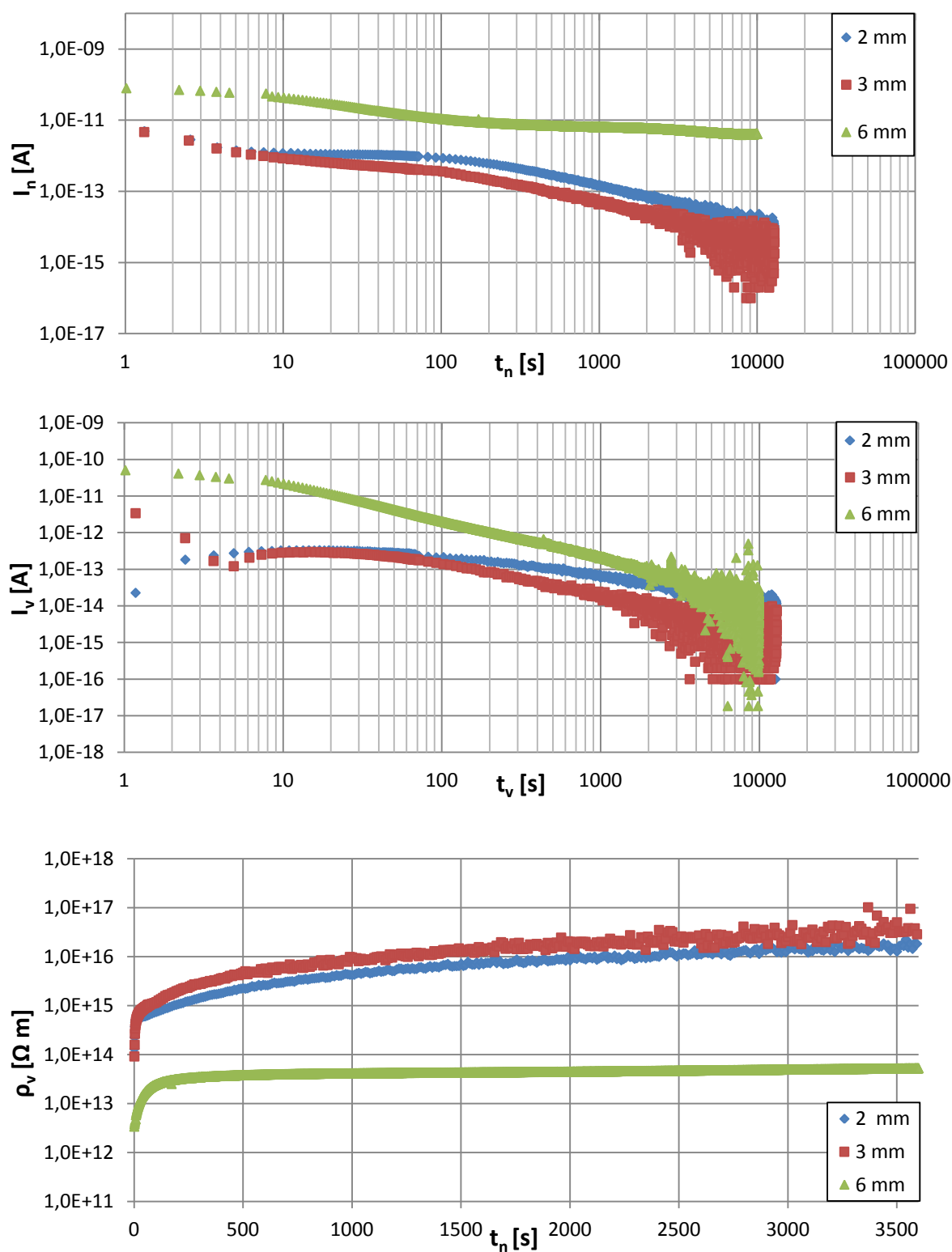


Obr. 68 Závislost konstantního namáhání $\varepsilon' = F(f)$ vzorku č.6 pro napětí 1,5 kV a tloušťku $h = 3$ mm s parametrem doby namáhání při frekvenci 50 Hz

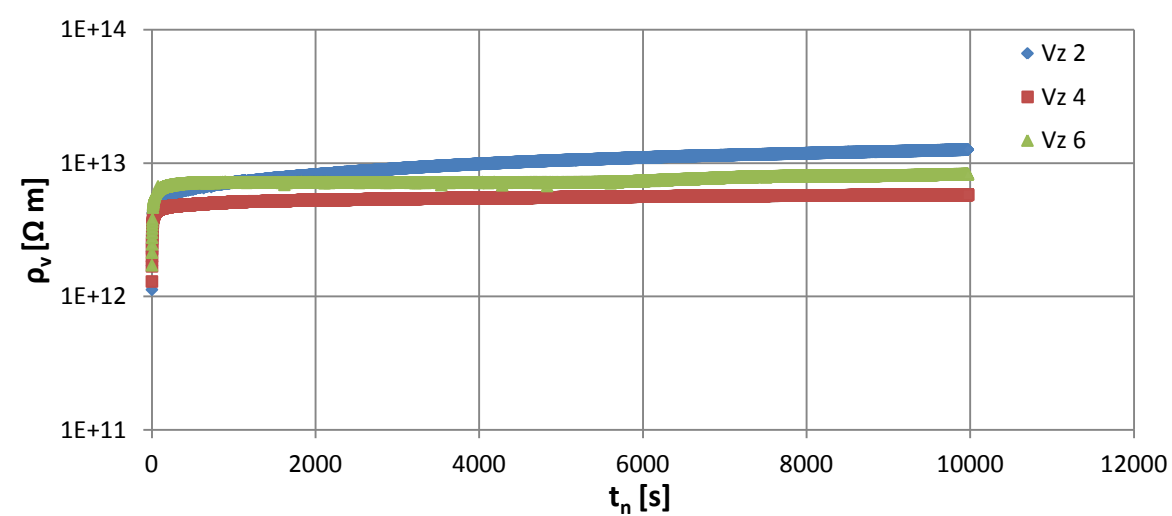
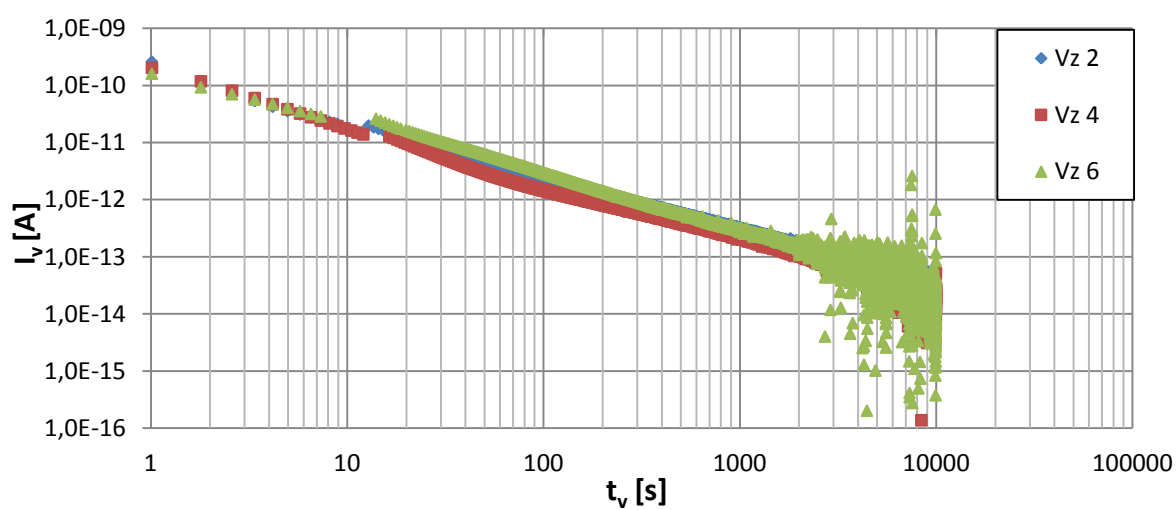
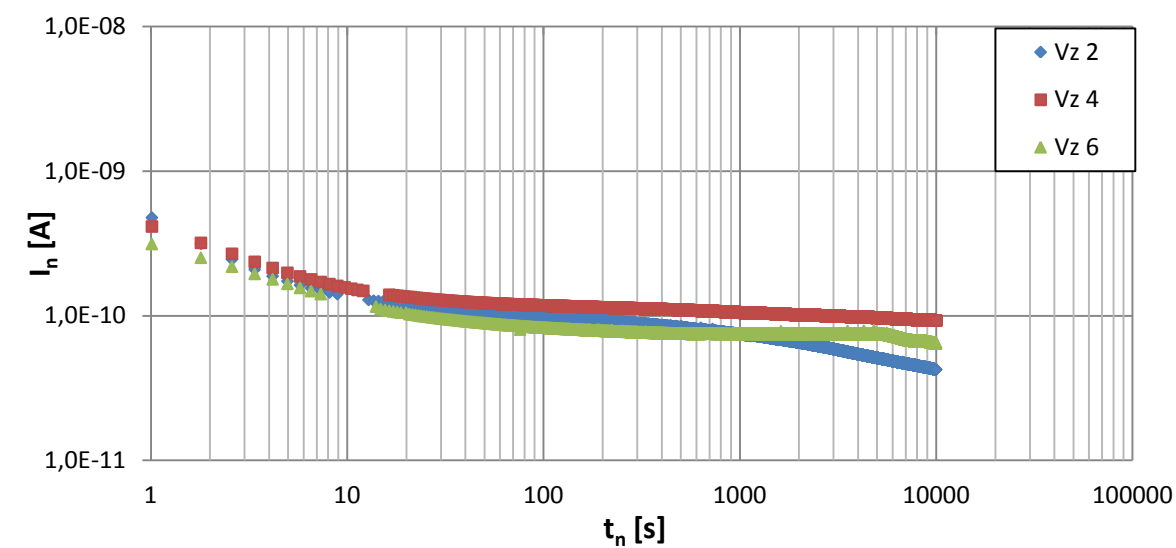


Obr. 69 Závislost konstantního namáhání $\varepsilon' = F(f)$ po době namáhání 200 h pro napětí 1,5 kV a tloušťku vzorku $h = 3$ mm při frekvenci 50 Hz

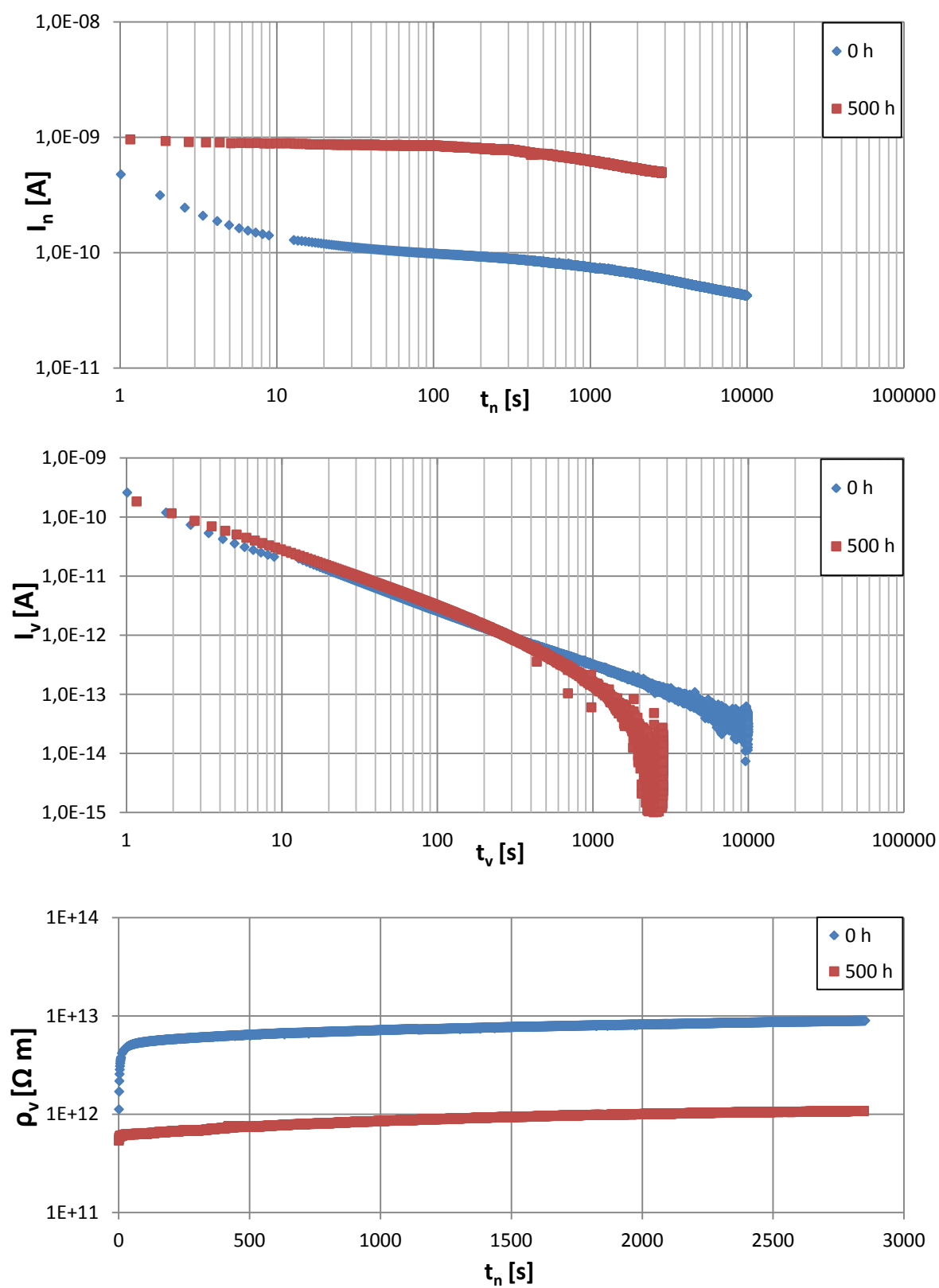
2.4.2 Stejnoseměrné měření



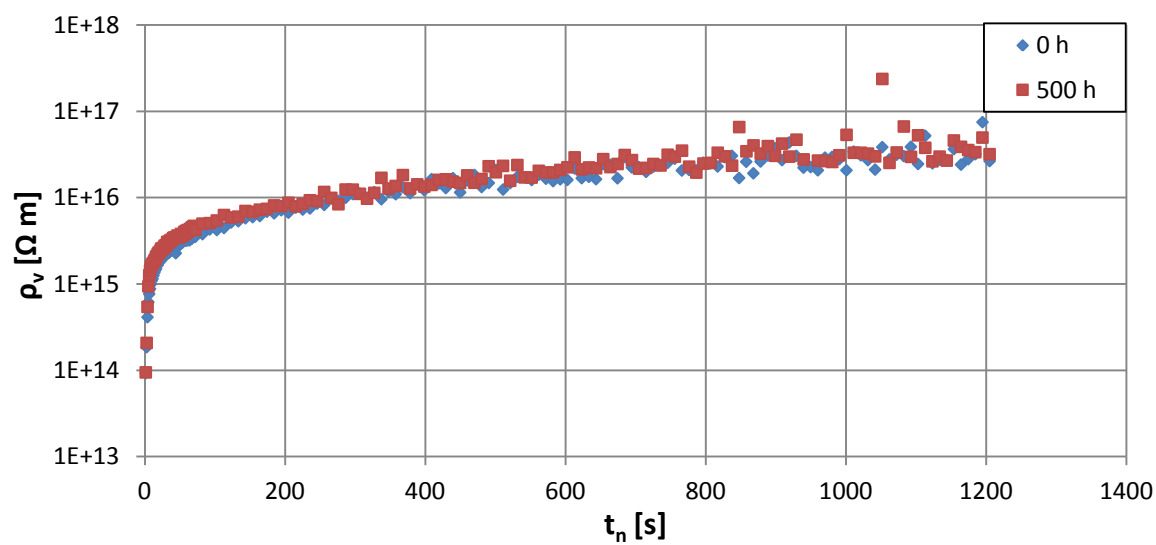
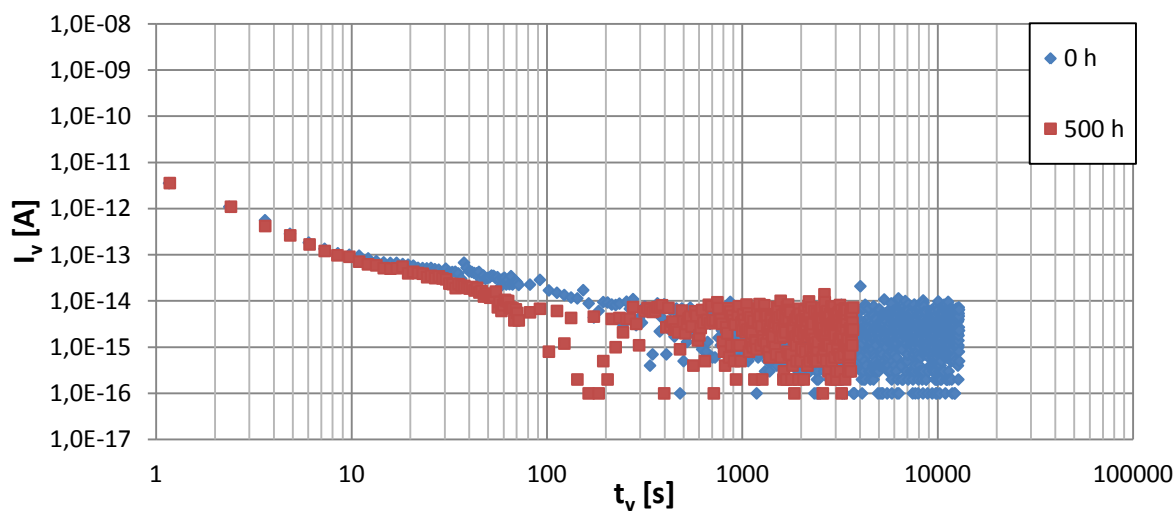
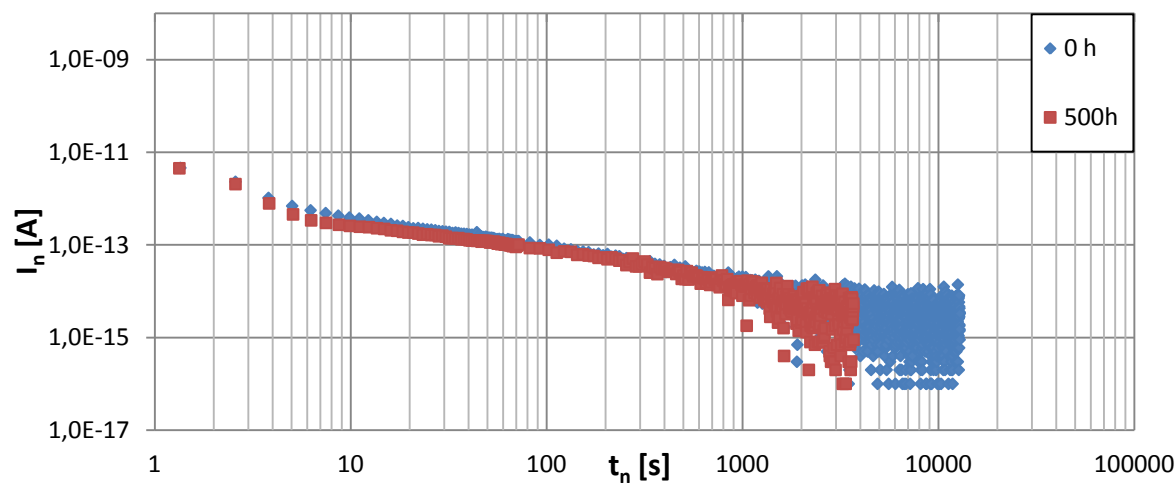
Obr. 70 Závislosti $I_n = F(t_n)$, $I_v = F(t_v)$, $\rho_v = F(t_n)$ nestárnutého vzorku č. 5 pro tloušťku $h = 2, 3, 6$ mm



Obr. 71 Závislosti $I_n = F(t_n)$, $I_v = F(t_v)$, $\rho_v = F(t_n)$ nestárnutých vzorků pro tloušťku $h = 3$ mm



Obr. 72 Závislosti konstantního namáhání $I_n = F(t_n)$, $I_v = F(t_v)$, $\rho_v = F(t_n)$ vzorku č. 2 pro napětí 1,5 kV a tloušťku $h = 3$ mm s parametrem doby namáhání při frekvenci 50 Hz



Obr. 73 Závislosti pulzního namáhání $I_n = F(t_n)$, $I_v = F(t_v)$, $\rho_v = F(t_n)$ vzorku č. 1 pro napětí 3 kV a tloušťku $h = 3$ mm s parametrem doby namáhání při frekvenci 1 kHz

2.4.3 Náhradní matematická funkce

Pro naměřená dielektrická spektra $\varepsilon'' = F(f)$ je možné stanovit Havriliak-Negamiho funkci (viz rovnice (21)). Získané parametry pak popisují intenzitu relaxace $\varepsilon_s - \varepsilon_\infty (\Delta\varepsilon)$, polohu relaxačního maxima τ_0 , jeho šířku α a asymetrii β , pro jednotlivé druhy namáhání. Úpravou rovnice (21) získáme pro ztrátové číslo vztah

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \sin \beta \phi}{\left[1 + 2 (\omega \tau_0)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha \pi}{2} + (\omega \tau_0)^{2(1-\alpha)} \right]^{\frac{\beta}{2}}}, \quad (61)$$

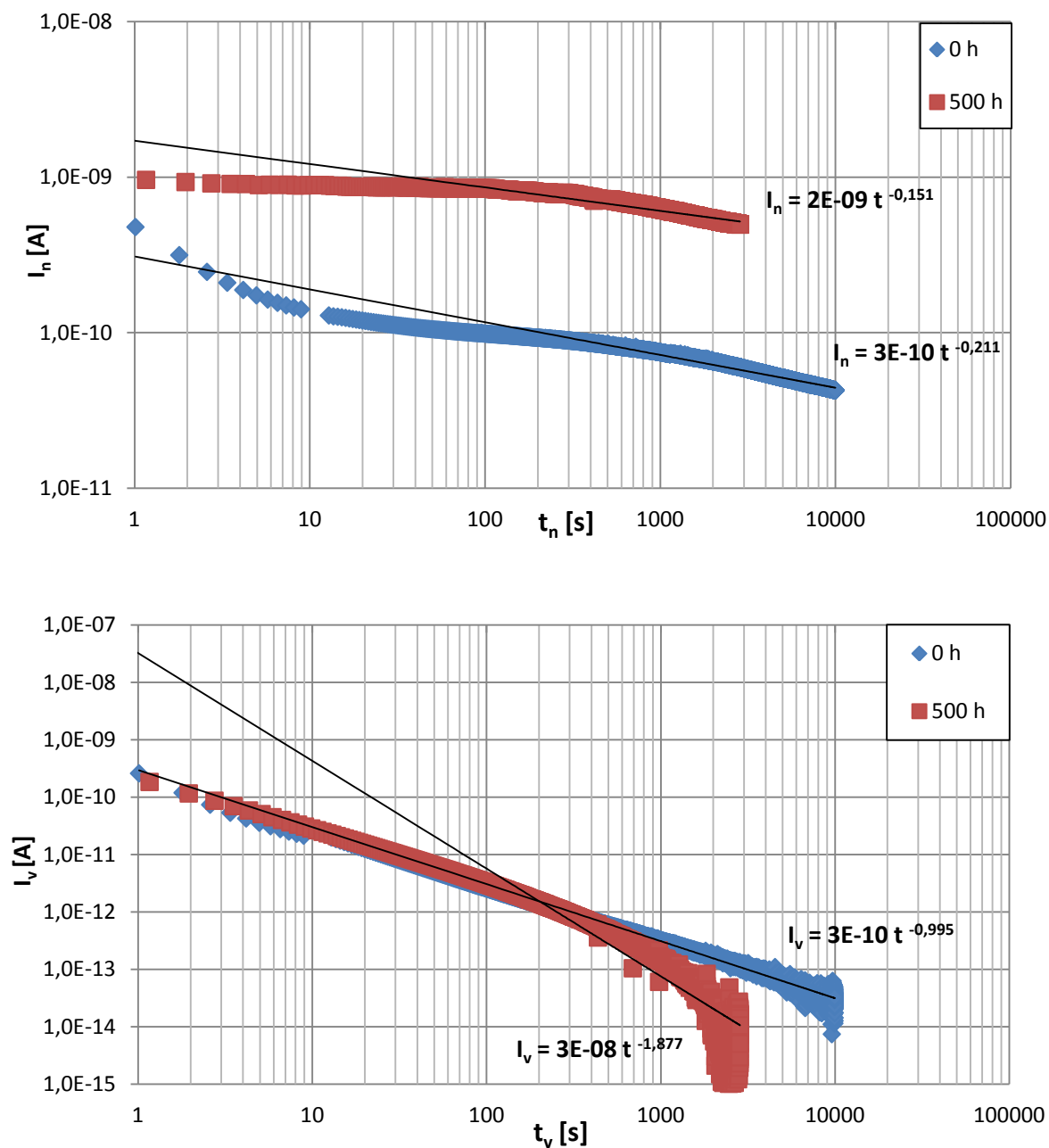
kde ϕ je dáno vztahem

$$\phi = \arctg \left[\frac{(\omega \tau_0)^{1-\alpha} \cos \left(\frac{\alpha \pi}{2} \right)}{1 + (\omega \tau_0)^{1-\alpha} \sin \left(\frac{\alpha \pi}{2} \right)} \right] \quad (62)$$

Z průběhů nabíjecích a vybíjecích proudů a absorpčních charakteristik lze dopočítat náhradní matematickou funkci. Jelikož se u zkoumaného materiálu vyskytuje více relaxačních jevů, byla zvolena jako náhradní matematická Curie–von Schweidlerova funkce, která má mocninný charakter

$$I_v = A t^{-n}, \quad (63)$$

kde I_v je vybíjecí proud, t je čas a A, n jsou koeficienty pro jednotlivé průběhy, které je nutné dopočítat.



Obr. 74 Závislosti konstantního namáhání $I_n = F(t_n)$, $I_v = F(t_v)$ vzorku č. 2 pro napětí 1,5 kV a tloušťku $h = 3$ mm s parametrem doby namáhání při frekvenci 50 Hz včetně mocninné funkce

Dané parametry se nám bohužel nepodařilo z důvodu časové náročnosti a rozsáhlosti experimentu stanovit.

Závěr

Diplomová práce se zabývá stejnosměrným, střídavým a pulzním elektrickým namáháním. Zkoumán byl vliv těchto faktorů na izolační materiál QUINN PS. K vyhodnocení jednotlivých namáhání byla využita metoda dielektrické relaxační spektroskopie. Tato metoda byla použita hlavně z důvodu jejího nedestruktivního charakteru. Zkoumání degradace a tím určování životnosti izolačního materiálu je jednou z nejdůležitějších součástí návrhu elektrických zařízení. V rámci experimentu byly měřeny závislosti ztrátového činitele $\tan \delta$ a paralelní kapacity C_p na kmitočtu, ze kterých byly vypočítány hodnoty relativní permitivity ϵ' a ztrátového čísla ϵ'' . Veličiny byly měřeny RLC - metrem Agilent E4980A v rozsahu 20 Hz až 2 MHz a Agilent E4285A v rozsahu 75 kHz až 30 MHz. Při stejnosměrném namáhání byly měřeny závislosti nabíjecího proudu I_n a vybíjecího proudu I_v na čase, ze kterých byly vypočítány hodnoty vnitřního odporu R_v a vnitřní rezistivity ρ_v . Veličiny byly měřeny elektrometry Keithley 6517A a Hewlett Packard 4339B s pomocí dvou různých elektrodových systémů. Kmitočtové a časové závislosti byly prošetřeny pro všechny vzorky, všechny druhy namáhání a doby stárnutí a jsou uloženy na přiloženém paměťovém médiu.

Přínos této práce je možno vidět v kompletním návrhu a sestavení pracoviště pro stejnosměrné, střídavé a pulzní elektrické namáhání. Důležité je zejména vytvoření přehledu doby života v průběhu pulzního namáhání. Rovněž bylo zapotřebí modifikovat pracoviště pro měření tak, aby měření bylo alespoň částečně zautomatizováno z důvodu časové náročnosti experimentální činnosti.

Pro ověření teoretických předpokladů průběhu degradace materiálů při stejnosměrném, střídavém a pulzním elektrickém namáhání by bylo zapotřebí rozsáhlejšího experimentu s delšími časy namáhání a využití některé z metod strukturální analýzy, ke sledování změn struktury materiálu při namáhání. Rovněž by mohlo být zkoumáný materiál vystaven teplotnímu namáhání nebo na něj mohlo být aplikováno kombinované namáhání, kdy na materiál působí více vlivů současně, případně i aplikovat na získaná data jeden z životnostech modelů pro posouzení doby života materiálu.

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: <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*. Dostupné z: 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.
- [13] KREJČÍ, Z. *Účinky pulzního namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

- [14] LIPTÁK, J., SEDLÁČEK, J. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Skripta ČVUT, Praha 2005.
- [15] LIEDERMANN, K., POLSTEROVÁ, H., ROZSÍVALOVÁ Z. *Klimatotechnologie*. Brno: VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004. 71 s.
- [16] LIEDERMANN, K.: *Stárnutí organických materiálů*: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.
- [17] TRNKA, P.: *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z [www: http://147.228.94.20:12100/casopis/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c2.pdf](http://147.228.94.20:12100/casopis/images/PDF/Rocnik2007/cislo1/r0c1c2.pdf)
- [18] Norma ČSN EN 60505 ed.2. *Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů*. 2005, 52 s.
- [19] Norma ČSN IEC 93. *Metody měření vnitřní rezistivity a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů*. 1993, 17 s.
- [20] Norma ČSN EN 62068-1 *Elektroizolační systémy – Elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy*. Část 1: Všeobecná metoda hodnocení elektrické odolnosti. 2004, 15 s.
- [11] MENTLÍK, V., PIHERA J., TÁBOŘÍK O., TRNKA P. *Vliv pulzního namáhání na izolační systém elektrických strojů*. In Diagnostika '07 [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/15.pdf>.
- [22] MENTLÍK, V., TRNKA, P., VITOUŠOVÁ, P., PIHERA, J. *Elektrické stárnutí složené izolace*. In Diagnostika '07 [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/42.pdf>.
- [33] PALÁN, R. *Pulzně namáhané elektroizolační materiály*. Oddělení elektrotechnologie, Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/10.pdf>.
- [24] KEITHLEY: 6517A *Operation manual* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.keithley.com/data?asset=388>

- [25] KEITHLEY: *8009 Resistivity Test Fixture Operation manual* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.keithley.com/data?asset=1219>.
- [26] FOTON: *HVGP0905P Základní technické údaje*. Dostupné z: <http://www.fotons.cz>
- [27] BMT Medical Technology [online]. *CLIMACELL*. 2008 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz/default.asp?nDepartmentID=112&nLanguageID=1>.
- [28] VOJTEK, V. *Studium vlivu vícefaktorového namáhání na dielektrická spektra izolačních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [29] BMT MEDICAL TECHNOLOGY. Brno. Česká republika. *SteriCell 22, 55, 111, 222, 404 – Návod k použití* [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz>
- [30] Agilent: *E4285A Precision LCR metr – Operation manual*, Yokogawa – Hewlett Packard LTD 2008, 523 s.

Seznam zkratek a symbolů

A	(s)	materiálová konstanta
b	(K)	materiálová konstanta
B	(s)	materiálová konstanta
C_p	(F)	kapacita
d	(V ⁻¹)	materiálová konstanta
E	(V m ⁻¹)	intenzita elektrického pole
E_p	(V m ⁻¹)	elektrická pevnost
f	(Hz)	frekvence
h	(m)	tloušťka vzorku
I	(A)	proud
j	(-)	imaginární jednotka
l	(m s ⁻¹ V ⁻¹)	materiálová konstanta
L	(s)	doba bezporuchového stavu
m	(kg)	hmotnost
n	(m ⁻³)	koncentrace nosičů elektrického náboje
N	(K ⁻¹)	materiálová konstanta
P	(C m ⁻²)	vektor polarizace
q	(C)	elektrický náboj
t	(s)	doba života izolace
T	(K)	absolutní teplota
U_p	(V)	průrazné napětí
$\operatorname{tg} \delta$	(-)	ztrátový činitel

α	(-)	koefficient rozložení relaxačních časů
β	(-)	asymetrie křivky relaxačního maxima
δ	(°)	ztrátový úhel
ε^*	(-)	komplexní permitivita
ε'	(-)	relativní permitivita
ε''	(-)	ztrátové číslo
ε_s	(-)	statická permitivita
ε_∞	(-)	optická permitivita
ε_0	(F m ⁻¹)	permitivita vakua
γ_V	(S m ⁻¹)	vnitřní konduktivita
ϑ	(°C)	teplota
μ	(m ² V ⁻¹ s ⁻¹)	driftová pohyblivost
ρ_V	(Ω m)	vnitřní rezistivita
ρ_P	(Ω)	povrchová rezistivita
τ	(s)	relaxační doba
τ_0	(s)	poloha relaxačního maxima
τ_E	(h)	doba života materiálu
ω	(rad s ⁻¹)	kruhový kmitočet
ω_m	(rad s ⁻¹)	maximální kruhový kmitočet