

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostické metody vhodné pro online diagnostiku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej RAUNER**

Osobní číslo: **E14B0202P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Diagnostické metody vhodné pro online diagnostiku**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Charakterizujte vysokonapěťové elektroizolační struktury.
2. Uveďte příklady kompozitních pevných a kapalných elektroizolačních struktur.
3. Uveďte a porovnejte můstkové a ostatní metody měření ztrátového činitele.
4. Ověřte prakticky měřením rozdíly obou metod.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN.
2. Mentlík, Trnka a kol. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na online diagnostické metody. Její první část popisuje používané elektroizolační systémy: pevné kompozitní materiály a elektroizolační kapaliny. Ve druhé části jsou vysvětleny fyzikální procesy vedoucí k dielektrickým ztrátám. Největší část práce se zabývá elektrotechnikou a online diagnostikou. Poslední část popisuje experimentální měření ztrátového činitele pevného izolačního materiálu.

Klíčová slova

Online diagnostický systém, elektroizolační struktura a materiál, kompozitní materiály, elektroizolační kapalina, polarizace, částečné výboje, dielektrické ztráty, ztrátový činitel.

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on online diagnostic methods. Its first part describes used electro insulating systems: a solid composite materials and an electro insulating liquids. The second part explains the physical processes leading to dielectric losses. The largest part of the thesis deals with electro technical and online diagnostics. In the last part is described an experimental measurement of the dissipation factor of the solid insulation material.

Key words

Online diagnostic system, electro insulating structure and material, composite materials, electro insulating liquid, polarization, partial discharges, dielectric losses, dissipation factor.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 4.6.2017

Ondřej Rauner

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce, za možnost spolupráce na projektech katedry a při přípravě konference Diagnostika 16. Především však děkuji své rodině a přítelkyni za podporu během studia.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD	11
1 ELEKTROIZOLAČNÍ STRUKTURY	12
1.1 TEPELNÉ VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ (TEPLOTNÍ TŘÍDY).....	13
1.1.1 Materiály odpovídající teplotním třídám.....	14
1.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	16
1.2.1 Resin-Rich.....	18
1.2.2 Vacuum Pressure Impregnation (VPI).....	19
1.2.3 Materiály pro kompozity od firmy DuPont.....	20
1.3 ELEKTROIZOLAČNÍ KAPALINY	22
1.3.1 Minerální oleje.....	22
1.3.2 Syntetické oleje.....	23
1.3.3 Rostlinné oleje.....	24
2 FYZIKÁLNÍ PROCESY UVNITŘ EIS PO PŘILOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE.....	25
2.1 POLARIZACE	25
2.1.1 Deformační polarizace.....	26
2.1.2 Relaxační polarizace.....	26
2.1.3 Migrační polarizace.....	28
2.2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	28
2.2.1 Ekvivalentní schéma vzduchové mezery v izolačním materiálu	30
2.2.2 Degradační účinky částečných výbojů	32
2.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY.....	33
2.3.1 Dielektrikum ve střídavém poli.....	33
2.3.2 Ztrátový činitel.....	34
3 ELEKTROTECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	37
3.1 ONLINE DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ	37
3.1.1 Měření napětí a proudu.....	38
3.1.2 Měření teploty	38
3.1.3 Další online měření	39
3.1.4 Návrh online měření ztrátového činitele oleje v transformátoru.....	40
3.2 ONLINE DIAGNOSTIKA VELKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ.....	41
3.2.1 Měření hluku	41
3.2.2 Vibrace čel vinutí	41
3.2.3 Další online měření.....	42
3.3 ONLINE DIAGNOSTIKA MALÝCH TOČIVÝCH STROJŮ	43
3.4 MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE	44
3.4.1 Scheringův můstek.....	44

3.4.2	Čtyřkapacitní Scheringův můstek.....	45
3.4.3	Automatizovaný Scheringův můstek.....	47
3.4.4	Dvojvektorová měřicí metoda	48
3.5	ONLINE MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	49
3.6	ELEKTRICKÁ PEVNOST	50
3.6.1	Typy průrazů	51
3.7	VODIVOST A IZOLAČNÍ ODPOR	52
4	EXPERIMENT.....	54
4.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	55
4.1.1	Tettex 2830/2831	55
4.1.2	Tettex 2821/RR.....	57
4.2	VÝLEDNÉ GRAFY	58
4.3	PRŮMĚRNÉ HODNOTY	62
4.4	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	64
5	ZÁVĚR.....	65
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

EIS	elektroizolační systém
EIM	elektroizolační materiál
RTE [°C]	relativní index teplotní odolnosti
PVC	polyvinylchlorid
PET	polyethylentereftalát
PTFE	polytetrafluorethylen
V-A	voltampérový
VPI	vakuově tlaková impregnace (vacuum pressure impregnation)
PWM	pulzně šířková modulace (pulse width modulation)
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
\vec{E} [V/m]	vektor intenzity elektrického pole
\vec{P} [C/m ²]	vektor polarizace
\vec{D} [C/m ²]	vektor elektrické indukce
$tg\delta$ [–, %]	ztrátový činitel
P_z [W]	ztrátový výkon
ω [rad/s]	úhlová frekvence
f [Hz]	frekvence
C [F]	kapacita
R [Ω]	elektrický odpor
I [A]	elektrický proud
U [V]	elektrické napětí
E_p [V/m]	elektrická pevnost
γ [S/m]	měrná elektrická vodivost (konduktivita)
ρ [Ω/m]	měrný elektrický odpor (rezistivita)
t [°C]	teplota
ϵ_0 [F/m]	permitivita vakua; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
ϵ [F/m]	absolutní permitivita materiálu
ϵ_r [–]	relativní permitivita materiálu
π [–]	matematická konstanta π ; 3,14159...

Úvod

V současnosti probíhá významný pokrok v řadě vědních oborů, často podpořený rychlým rozvojem elektrotechniky a elektroniky. Zároveň rostou nároky na spolehlivost elektrických zařízení. Důležitým aspektem jdoucím ruku v ruce s novými technologiemi je přenos informace ukazující současný stav sledovaného objektu a možnost z ní predikovat stav nadcházející. Stejně jako si běžní lidé nedokážou představit svět bez informací z domova, ze světa a ze sportu, tak i elektrotechnické podniky nemohou fungovat, aniž by znaly aktuální informace o provozu svých strojů. K tomu slouží elektrotechnická diagnostika, jejímž úkolem je zjistit co nejvíce informací o sledovaném stroji či zařízení.

Diagnostika přinášející aktuální informace se označuje online. Její hlavní výhodou je, že monitorované zařízení nemusí být mimo provoz, což znamená ušetření nemalých nákladů. Zřídka se online diagnostika uplatňuje u malých točivých strojů, a to z důvodu nízké rentability. Samotný diagnostický systém totiž může být mnohonásobně dražší, než diagnostikovaný stroj. U vysokonapěťových transformátorů a velkých točivých strojů je vhodné instalovat online diagnostický systém. Důvodem je predikce poruchy, včasné podchycení selhání zařízení, vnik hospodářských ztrát, v horším případě i ztrát na lidských životech. Životnosti diagnostického systému je, v porovnání s diagnostikovaným zařízením, kratší. Také při porovnání spolehlivostí je na tom lépe diagnostikované zařízení, jelikož u online diagnostického systému nelze zamezit závadám jako výpadek internetu (nemožnost přenést naměřená data), rychlé opotřebení měřících sond, apod. To jsou důvody proč online diagnostický systém neustále vylepšovat.

Na elektroizolačním systému závisí plynulý chod zařízení, a proto je důležité se zabývat jeho diagnostikou. Při konstruování elektrických zařízení musí dojít k propojení mnoha vědních disciplín z technické i netechnické oblasti. Jejich podrobný rozbor však přesahuje rozsah bakalářské práce.

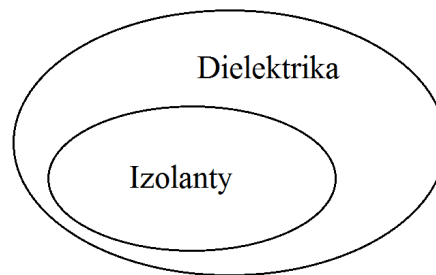
Mým cílem v dalším studiu je spolupráce s Elektrotechnickou fakultou na vývinu nových online diagnostických systémů. To je také důvod, proč se práce zaměřuje právě na tuto problematiku.

1 Elektroizolační struktury

Každé elektrické zařízení obsahuje elektroizolační materiály, na kterých závisí jeho spolehlivost. Nejcitlivějším článkem v řetězci bezpečného provozu zařízení jsou právě izolanty. Pojmy dielektrika a izolanty bývají často zaměňovány. [1]

Dielektrikum lze chápat jako látku se schopností vytvořit vlastní elektrické pole při vložení do vnějšího elektrického pole – polarizovat se. Vlastnosti dielektrika závisí na chemickém stavu, složení, struktuře, skupenství či existenci dipólových momentů. [1] [2]

Izolant je materiál pro odizolování dvou míst (elektricky aktivních prvků) s různým potenciálem a zabránění průchodu elektrického proudu mezi nimi. Jak je patrné z obrázku, tak izolanty jsou podmnožinou dielektrik. [1] [2]



Obrázek 1: Dielektrika a izolanty.

V teorii se lze setkat s pojmem ideální izolant, který má nekonečnou vnitřní i povrchovou rezistivitu, nulový ztrátový činitel, nekonečné průrazné napětí a je bez obsahu nosičů náboje. V praxi se však taková látka nevyskytuje a její charakteristické veličiny mají konečnou hodnotu. [1] [2]

Vlastnosti dobrého izolantu:

- **Elektrické**
 - Elektrická pevnost – co nejvyšší, v řádech kV.
 - Rezistivita – větší než $10^{12} \Omega \cdot m$ (povrchová a vnitřní).
 - Relativní permitivita – více než 2,8.
 - Ztrátový činitel – velmi malý, cca 10^{-3} .

- **Neelektrické**
 - Mechanické – pevnost, houževnatost.
 - Tepelné – tepelná vodivost, odolnost proti teplotě a hoření, teplota tání.
 - Fyzikálně – chemické (navlhavost, chemická odolnost).

[3]

Na výše uvedené vlastnosti mají vliv především provozní podmínky jako teplota, tlak, vlhkost, napětí, frekvence, apod.). [2]

1.1 Tepelné vlastnosti izolačních materiálů (teplotní třídy)

Pokud budeme posuzovat elektroizolační materiál, tak neopomenutelným aspektem z hlediska funkčnosti je závislost na teplotě. Při provozu elektrických zařízení (př. točivý stroj) vniká teplo působící na izolaci. Zvýšená teplota je nejvýraznějším degradačním činitelem, a proto na ni musí být brán zřetel při konstrukci zařízení. Každý izolační materiál má svoji tepelnou oblast použití závisující na struktuře. Pro vhodné aplikování izolantu v praxi musí být brány v potaz nejen teplotní konstanty (měrná tepelná kapacita, součinitel teplotní vodivosti a teplotní součinitel délkové resp. objemové roztažnosti), ale i jeho tepelná odolnost. To je také důvodem rozdělení izolantů do teplotních tříd. Teplotní odolnost vysvětluje norma ČSN EN 60085 (330250) ed. 2. [3] Norma zavádí termíny: Elektroizolační materiál (EIM) a Elektroizolační systém (EIS). Elektroizolační systém je izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů. Norma dále definuje tzv. Relativní index tepelné odolnosti (RTE), jehož hodnota ve stupních Celsia udává teplotu, při níž má daný materiál požadované vlastnosti v porovnání se standardním materiálem. [1] [2]

Tabulka 1: Teplotní třídy izolačních materiálů (dle [3])

RTE [°C]	Teplotní třída	Předchozí označení
< 90	70	–
90 – 105	90	Y
105 – 120	105	A
120 – 130	120	E
130 – 155	130	B
155 – 180	155	F
180 – 200	180	H
200 – 220	200	N
220 – 250	220	R
> 250	250	–

1.1.1 Materiály odpovídající teplotním třídám

V následující kapitole budou uvedeny teplotní třídy a jejich typičtí zástupci.

- **Teplotní třída 70**

Organické materiály: papír, dřevo, bavlna, hedvábí. Materiály jsou bez úpravy a impregnace. Mají malé využití v elektrických zařízeních. [1]

- **Teplotní třída 90 (Y)**

Organické materiály s impregnací (šelak asphalt, oleje): papír, dřevo, bavlna a hedvábí. PVC (polyvinylchlorid) – izolace vodičů a izolační trubičky. Dále sem řadíme vulkanizovaný kaučuk nebo termoplasty. [1] [4]

- **Teplotní třída 105 (A)**

Organické látky jsou stejné jako v předchozím případě, také jsou impregnovány (šelak, olej, celulósový a asfaltový laky) Syntetické látky (vlákna) jsou na bázi celulózy. Do této skupiny se řadí také lepenky: lesklé, drážkové, transformátorové. Dalšími zástupci jsou syntetické tkaniny lakované olejem, lepicí pásy na bázi papíru, akrylátu v kombinaci s PET (polyethylentereftalát) fólií či kaučukem. Dále různé tkaniny apod. [1] [4]

- **Teplotní třída 120 (E)**

Organické materiály této teplotní třídy jsou papír (celulósový, tvrzený), tvrzená tkanina, nebo pryskyřicemi (např. epoxidová, formaldehydová) impregnovaná buničina. Můžeme sem zařadit i různé lamináty, jež díky vhodné povrchové úpravě odolávají navlhání. Zástupci teplotní třídy E jsou používány pro izolace nízkonapěťových systémů. [1] [4]

- **Teplotní třída 130 (B)**

Používání samotných organických materiálu není v této třídě ideální, proto se užívají kombinace např.: tvrzeného papíru a lepicí pásky na bázi PET a kaučuku. Více užívané jsou materiály anorganické jako skleněná vlákna, azbest nebo sulfátový papír s vhodnými pojivy. [1]

- **Teplotní třída 155 (F)**

Slídový papír, skleněná vlákna, PET, aramidový papír (Nomex®) a epoxidové pryskyřice jsou materiály vhodné pro použití v teplotní třídě 155 (F). Dalšími zástupci jsou kompozitní materiály s epoxidovým pojivem a plnivem ze skleněné tkaniny. [1]

- **Teplotní třída 180 (H)**

Zde již převládá používání kompozitních materiálů se silikonovým pojivem a plnivem ze skleněné tkaniny nebo slídového papíru. Dále jsou využívány aramidy polyamidy, polyestery, slída či slídový papír, který se vyskytuje pod různými názvy (Samica, Calmica, Cogemica, apod.) záviselými na výrobcích. [1]

- **Teplotní třída 200 (N)**

Do této skupiny se řadí kompozitní materiály se silikonovým pojivem a plnivem ze skla, azbestu nebo aramidového papíru. Silikonová zalévací hmota odolává vibracím, tlaku a je velmi pružná. [1] [4]

- **Teplotní třída 220 (R)**

Materiály jsou stejné jako v předchozí třídě, navíc lze použít také sklo ve formě vláken. [1]

- **Teplotní třída 250**

Vhodné materiály pro použití v této teplotní třídě jsou polyamidy ve formě fólie (Kapton®, ALCONEX GOLD®), aramidy (Nomex®), PTFE (polytetrafluorethylen). Je možno použít i materiály ze třídy 220, ale je nutná úprava silikonového pojidla. [1] [4]

- **Materiály mimo teplotní třídy**

Jde o materiály, které se výrazněji liší od teplotních tříd stanovených v normě ČSN EN 60085 (330250) ed. 2, nebo to jsou materiály na pomezí mezi teplotními třídami. Keramické izolanty (silikátové, bezsilikátové, oxidové, bezoxidové) odolají výraznému teplotnímu namáhání. Dále pak polyamidy – Kapton®, který dle údajů výrobce krátkodobě odolá i teplotám vyšším než 450 °C. [1] [4]

1.2 Kompozitní materiály

Zvyšující se požadavky na vysokonapěťové EIS točivých strojů a transformátorů si žádá stále vylepšování vlastností těchto materiálů. Žádný materiál není schopen sám o sobě vyhovět náročným požadavkům pro vysokonapěťové použití – velká elektrická pevnost, vysoká hodnota izolačního odporu, velká tepelná odolnost, nízké ztráty. Z tohoto důvodu stále narůstá využitelnost kompozitních materiálů v průmyslu (nejen v elektrotechnickém), ale také ve zdravotnictví a dalších vědních oborech. Kompozitní materiál lze definovat jako materiál skládající se ze dvou a více substancí, které mají různé vlastnosti a ve výsledku dávají materiálu nové vlastnosti nemající žádná ze substancí sama o sobě. V elektrotechnice dochází ke kombinaci elektrických a mechanických vlastností. Složky kompozitních materiálů jsou nosná složka, pojivo a plnivo. [1] [5]

- **Nosná složka** – papír, bavlněná tkanina, skleněná tkanina, fólie (polyesterová, polyethylenfóliová, polyamidová, atd.
- **Pojivo** – pryskyřice (epoxidová, polyesterová, silikonová).
- **Plnivo** – v elektrotechnice je to slída v podobě slídového papíru.

[1]

Výrobky s obsahem skleněné tkaniny kolem 70 % až 80 % mají nejlepší vlastnosti. Na trhu lze narazit na velké množství kompozitních výrobků s různými jmény, ale v principu jde o následující varianty:

- **Tvrzené papíry** – konstrukční charakter, teplotní třída 120 (E), pojivem je

formaldehydová pryskyřice a nevýhodou jsou vysoké ztráty.

- **Tvrzené tkaniny** – odolávají mechanickému namáhání, teplotní třída 120 (E), pojivem je formaldehydová pryskyřice.
- **Tvrzené skleněné tkaniny** – používají v místech s horšími klimatickými podmínkami, jednotlivé druhy se liší pojivem (pryskyřice nebo polyestery) a nosným materiálem je skleněná tkanina.
- **Tvrzené vrstvené dřevo** – vyrábí se dýhováním bukového dřeva, následný prosycením pryskyřicí a vytvrzením. Díky schopnosti absorpce oleje se využívá v konstrukční části transformátorů.

[1]

Slída je hojně využívaná jako plnivo do kompozitních materiálů. Důvodem jsou její vynikající vlastnosti dané strukturou, v níž se vyskytují silné kovalentní vazby křemíku a kyslíku. Je také hlavním izolačním materiálem pro vysokonapěťové izolace. V přírodě se vyskytuje v mnoha modifikacích. Slída má prakticky neměnné vlastnosti až do tzv. kalcinační teploty, při níž uvolňuje ze své struktury vázanou vodu. Jde o skokovou změnu a po překročení této teploty je slída prakticky nepoužitelná. V elektrotechnice používáme dvě modifikace – muskovit a flogopit. [1] [6]

- *Muskovit*

Jedná se o draselnou slídu, která je bezbarvá, světlehnědá a světlezelená. Kalcinační teplota je 700 – 800 °C; $tg\delta = 1 \div 10^{-4}$; $\varepsilon_r = 6 \div 7$; $E_p = 60 \text{ kV/mm}$; $\rho_V = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$. [1] [6]

- *Flogopit*

Jedná se o slídu na bázi hořčíku, která má tmavou, jantarovou barvu (někdy zlatou). Kalcinační teplota je 900 – 1000 °C; $tg\delta = 1 \div 10^{-5}$; $\varepsilon_r = 5 \div 6$; $E_p = 45 \text{ kV/mm}$; $\rho_V = 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$. [1] [6]

Mikanity jsou slídové výrobky používané jako elektroizolační materiály. Slída je v nich aplikována ve formě slídových lístků (krystalů). Mikanity mají výbornou tlakovou odolnost, dají se dobře brousit, rezat a stříhat. Problém s ohýbáním a tvarováním vyřešil tzv. ohebný mikanit. [1] [6]

- *Ohebný mikanit*

Při běžných teplotách je ohebný a tvárný. Jde o třífázový kompozit složený ze slídových lístků, kalcinovaného papíru a skleněné tkaniny. Řadí se do teplotní třídy 130 (B) a používá se k prokládání vodičů a izolování oblých částí elektrických strojů. K vytvrzení dochází po impregnaci celého vinutí. [1] [6]

- *Mikafolium*

Materiál se skládá z podkladového materiálu (speciální celulózní papír) a ze slídových lístků. Papír a lístky jsou spojeny šelakem. Výsledkem je slídová páska sloužící k izolování cívek elektrických strojů do provozního napětí 6 kV a teplotní odolnost je ve třídě 130 (B). [1] [6]

Rekonstruovaná slída (remika) se získává z přírodní slídy a zpracovává se do slídové folie. Během zpracování je mechanicky, chemicky nebo tepelně rozdrobena na drobné šupiny, které společně vytváří kašovitou směs. Ta se dále vyválcuje na slídovou fólii. Výroba může být prováděna dvěma způsoby – Bardetův a Heymannův. V moderní elektroizolační technice se používají dva typy systému zakládajících se na remice. Jsou to Resin-Rich a VPI. [1] [6]

1.2.1 Resin-Rich

Tento systém využívá tříslůžkový kompozitní materiál, jehož nosnou částí je skleněná tkanina s tloušťkou 0,12 mm až 0,14 mm. Pokud je tkanina slabší, tak se pro stejný počet ovinů materiálu použije stejné množství slídy jako u silnější varianty. Dochází tak k úspoře materiálu a i zvýšení elektrické pevnosti. Následně se nanese kalcinovaný slídový papír jako izolační bariéra, která se skleněnou tkaninou spojí pomocí pojiva v podobě epoxidové pryskyřice. Tento základ se poté nechá vytvrdit za pomoci katalyzátorů při teplotách kolem 170 °C. Následuje pozvolné ochlazování, aby se zabránilo vzniku defektů vzniklým různou rychlostí ochlazování jádra a izolace. Takto provedená izolace splňuje náročné požadavky na vysokonapěťové odizolování. Požití systémů resin-rich je hlavně ve vysokonapěťových strojích (až do nejvyšších napětí), ale také jako izolace pólových, rotorových a trakčních cívek. [1] [7] [8]

Takto vyrobených materiálů je celá řada a závisí na konkrétním výrobcí jaký druh nosné složky, pojiva či plniva použije. Příklady materiálů: Samicatherm®, MicaRich®, Relanex®, Relastik®, Kalastik®, Remikaflex®. [1] [7] [8]



Obrázek 2: Izolace provedená systémem resin-rich. Převzato z [8].

1.2.2 Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

Tento typ izolace se používá zejména pro vysokonapěťové motory a generátory, kde je nutné vyplnit díry v materiálu a vytvořit tak izolaci bez dutinek. Například v trakčních motorech je nutné vytvořit zpevňující systém vinutí s výbornými teplotními a elektroizolačními vlastnostmi. Impregnace ve vakuu se používá z důvodu zabránění průniku vnější vlhkosti do impregnovaného kompozitního izolantu. Důležitou vlastností tohoto kompozitu je savost, a to z důvodu dobrého proimpregnování všech vrstev nosné (skleněná tkanina, polyamidová pryskyřice, atd.) a pojiva, které musí být slučitelné s impregnační látkou. Dnes nejvíce užívaným impregnantem jsou látky na bázi epoxidové pryskyřice s obsahem katalyzátoru, který urychluje impregnační proces. Při použití pryskyřice bez obsahu rozpouštědel je technologie šetrná k životnímu prostředí. [1] [9] [10]

Postup procesu VPI začíná aplikováním základní pásky na místo, které má být odizolováno. Přípravek se vloží do pece, čímž dojde k odpaření vzdušné vlhkosti. Eliminace vzdušné vlhkosti pomáhá impregnačnímu materiálu proniknout dobře do struktury. Následně se umístí do vakuové komory (proces umístování přípravku je patrný z obrázku 3), kde dojde k odstranění zbývajících vlhkosti a vzduchu. Komora se vyplní pryskyřicí. Poté se sníží hladina vakua a přípravek se nechá v lázni předem stanovenou dobu. Dále se do komory vhání suchý vzduch, dusík nebo jiný plyn, kterým se docílí většího proimpregnování. Po tomto

procesu se zavede normální tlak a přípravek se vyjme a umístí do pece, kde vlivem zvýšené teploty dochází k vytvrzení pryskyřice. [1] [9] [10]



Obrázek 3: Pracovník firmy Sloan Electromechanical Service & Sales umísťuje přípravky do vakuové komory. Převzato z [9].

Materiály pro VPI mohou být Samicapor® (vysoce savá páska) pro izolační systém Samicabond® s nenasycenou polyesterimidovou pryskyřicí. Použití konkrétních materiálů závisí na výrobci a na použití celého EIS. [11]

1.2.3 Materiály pro kompozity od firmy DuPont

DuPont (USA, sídlo: Wilmington ve státě Delaware) je významnou světovou firmou podnikající v oblasti chemické výroby. Nabízí rozsáhlé portfolio výrobků z oblasti: potravin, elektronika, barvy, plasty, elektroizolační materiály, apod. Světovou proslulost získaly firmě patenty na materiály jako Nylon, Teflon, Lycra či Kevlar. [12]

- **Nomex®**

Nomex® je syntetický materiál vyráběný z aramidů. Díky teplotní odolnosti je hojně využíván hasiči po celém světě. Postupem času si však našel uplatnění také v elektrotechnickém průmyslu jako elektroizolační materiál ve vysokonapěťovém prostředí. Výroba se provádí tzv. kalandrováním (typ válcovací techniky) za vysokých teplot. Elektrické

vlastnosti ($\epsilon_r = 2,5$; $E_p = 30 \div 160 \text{ kV/mm}$; $\rho_V = 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$) si zachová i při dlouhodobém působení vysokých teplot ($220 \text{ }^\circ\text{C}$). Dobře se kombinuje a propojuje s pryskyřicemi a tvoří tak kombinovaný izolant. Nomex® se používá v transformátorech, generátorech, turbínách, hybridních elektrických vozidlech a v celé další škále elektroizolačních aplikací. [1] [13] [14]



Obrázek 4: Izolace vinutí elektrického stroje pomocí Nomexu®. Převzato z [15].

- **Kapton®**

Kapton® je polyamid dodávaný ve formě fólie a disponující vynikajícími elektrickými vlastnostmi: $\epsilon_r = 3 \div 3,5$; $E_p = 6 \div 40 \text{ kV/mm}$; $\rho_V = 1,5 * 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$. Kapton® vykazuje vysokou spolehlivost, životnost a nízké ztráty. Uchovává si své elektrické, teplené, chemické, a mechanické vlastnosti i za nepříznivých klimatických podmínek a působení extrémně vysokých teplot ($300 \text{ }^\circ\text{C}$). Zajímavostí je, že byl použit i společností NASA v lunárním modulu Apollo 11, kde plnil roli teplené izolace. [1] [16] [17]



Obrázek 5: Izolační pásy vyrobené z Kaptonu®. Převzato z [17].

1.3 Elektroizolační kapaliny

Nejčastěji používané elektroizolační kapaliny jsou oleje. Elektroizolační (transformátorové) oleje se používají ve výkonových transformátorech, kde plní chladicí a izolační funkci. Malé transformátory bývají často chlazeny vzduchem. Jiným typem izolace transformátorů mohou být kompozitní materiály. [18]

1.3.1 Minerální oleje

Minerální oleje jsou v dnešní době nejčastěji používaným typem elektroizolačních kapalin. Získávají jsou destilací ropy a její následnou rafinací. Z hlediska izolační a chladicí schopnosti jsou minerální oleje na dobré úrovni. Z důvodu nízké ceny jsou velmi rozšířené. Hůře jsou na tom z hlediska ekologického. V případě havárie při zpravování či převozu je dopad na životní prostředí katastrofální. Proces výroby je technologicky náročný. V budoucnu by mohl být problém s nedostatkem hlavní výrobní suroviny – s ropou. [1] [19] [20]

Příklady komerčních elektroizolačních kapalin minerálního původu:

- **MOGUL TRAFO CZ-A**

Jde o typ transformátorového oleje pro všechny napěťové hladiny. Je vhodný pro stroje s vysokým výkonem a možností přetížení. Může najít uplatnění i v jiných typech zařízení. Vyrábí se z hluboce rafinovaného základového oleje, který se získává z parafinické ropy. Elektrické vlastnosti: $U_p = 75 \text{ kV}$; $tg\delta_{(90^\circ\text{C})} = 10^{-3}$; $\rho = 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$. [21]

- **MOGUL TRAFO N-A**

Tento typ transformátorového oleje se použitím neliší od předchozího. Odlišnost je ve výrobě. Vyrábí se z hluboce rafinovaného základového oleje, který se získává z naftenické ropy. Elektrické vlastnosti: $U_p = 75 \text{ kV}$; $tg\delta_{(90^\circ\text{C})} = 10^{-3}$. [22]

- **Shell Diala S2 ZU-I**

Shell Diala S2 ZU-I je vyroben ze speciálně rafinovaného základového oleje, který zajišťuje vysokou oxidační stabilitu. Udržuje si dobré elektroizolační vlastnosti za nízkých teplot. [23]

- **Shell Diala S3 ZX-I**

Shell Diala S3 ZX-I je prémiový elektroizolační olej. Vyrábí se ze speciálně rafinovaného olejového základu se zanedbatelným obsahem síry. Také má dobré elektroizolační vlastnosti za nízkých teplot. [24]

1.3.2 Syntetické oleje

Syntetické oleje se vyrábí syntézou nízkomolekulárních látek vytvářejících komplexní molekuly. Rozdílem oproti minerálním olejům je, že hlavní vstupní surovinou není ropa. Z tohoto důvodu méně zatěžují životní prostředí. Hlavní výhodou je výborná teplotní odolnost a nehořlavost. To je důvod pro používání v oblastech s důrazem na požární bezpečnost. Samozřejmostí jsou vynikající elektroizolační vlastnosti. Kapaliny na syntetické bázi lze rozdělit do několika skupin: syntetické uhlovodíky, organické estery, estery kyseliny fosforečné, polyglykoly a ostatní (silikony, silikáty, fluorované uhlovodíky). [19] [20]

Příklady komerčních elektroizolačních kapalin syntetického původu:

- **MIDEL 7131**

Jde o typického zástupce syntetických olejů, jenž byl vyvinut v 70. letech 20. století. Má vysoký bod vzplanutí a odolává vzdušné vlhkosti. Elektrické vlastnosti: $U_p = 47$ kV; $tg\delta_{(90^\circ\text{C})} = 0,008$. Zkouškami byla ověřena jeho šetrnost k životnímu prostředí. Využití našel v celé řadě aplikací např.: výkonové transformátory nad 238 kV, transformátory pro elektrickou trakci, větrné elektrárny či lodě. [19] [25] [26]

- **Shell Fluid 4600**

Shell Fluid 4600 je syntetický olej využívaný v transformátorech s citlivostí na znečištění ropnými produkty. Své uplatnění má i v oblastech s vyššími nároky environmentální zatížitelnost. Elektrické vlastnosti: $U_p > 60$ kV; $tg\delta_{(90^\circ\text{C})} < 0,01$. [27]

1.3.3 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje se získávají ze zemědělských plodin (slunečnice, řepka olejná, atd.). Na výslednou kvalitu rostlinného oleje má největší vliv kvalita sklizených semen, oblast, v níž byla pěstována a také množství srážek (počasí).

Celý proces zpracování začíná sklizní dané olejnin, která se odváží na posklizňovou linku. Tam je z každého přivezeného valníku odebrán vzorek, který se posoudí podle daných kritérií. Jako příklad poslouží kritéria pro řepku olejnou – vlhkost kolem 8 %, obsah oleje cca 40 % a obsah nečistot do 2 %. Následuje čištění a případné sušení. Takto zpracovaná semena se rozdrtí, čímž zvětší svůj povrch. Následuje vlastní získávání oleje lisováním, extrakcí (chemické získávání oleje) či jejich kombinací. Získaný olej však není možné použít pro elektroizolační účely. Důvodem je velký obsah nežádoucích složek majících negativní vliv na výsledný produkt. Následuje rafinace, při níž dojde k zušlechtění oleje. Dochází k odstranění volných mastných kyselin, tzv. odkyselování. Schéma zpracování olejnin je vidět na následujícím obrázku. [19] [28]



Obrázek 6: Proces zpracování olejnin na olej. Převzato z [19].

Příklady komerčních elektroizolačních kapalin rostlinného původu:

- **MIDEL eN 1204**

Tento typ transformátorového oleje vyrábí britská společnost M&I Materials Ltd. Základní surovinou pro výrobu jsou semena řepky olejné zpracovávaná výše uvedeným způsobem. MIDEL eN 1204 má bod vzplanutí vyšší než 300 °C, je vhodný pro venkovní i vnitřní užití a má dlouhou životnost. Elektrické vlastnosti: $U_p \geq 30$ kV; $tg\delta_{(90^\circ\text{C})} < 0,03$. [29]

- **Envirotemp FR3**

Další z řady rostlinných olejů je Envirotemp FR3. Dle výrobce [30] (firma Cargill) byl použit v mnoha výkonových a distribučních transformátorech s napětím přesahujícím 420 kV. Výrobce udává teplotu vzplanutí je 360 °C a hořlavost je velmi malá. [30]

2 Fyzikální procesy uvnitř EIS po přiložení elektrického pole

Po vložení elektroizolačního materiálu do vnějšího elektrického pole dochází ke strukturálním změnám v celém materiálu. Tyto změny mají majoritní vliv na funkčnost celého EIS. Práce se zaměřuje na podrobnější popis polarizací a částečných výbojů (zbylé faktory jsou popsány v [1]).

2.1 Polarizace

Polarizací je myšlen proces, při kterém dochází k narušení uspořádání elektrických nábojů. Následkem tohoto děje se v dielektriku vytvářejí dipóly, které mají svůj vlastní moment, tzv. dipólový moment. Podle vzniku dipólových momentů lze dielektrika dělit do dvou skupin – polární a nepolární. Polárnost látky silně ovlivňuje relativní permitivitu materiálu a velikost dielektrických ztrát [1] [31] [32]

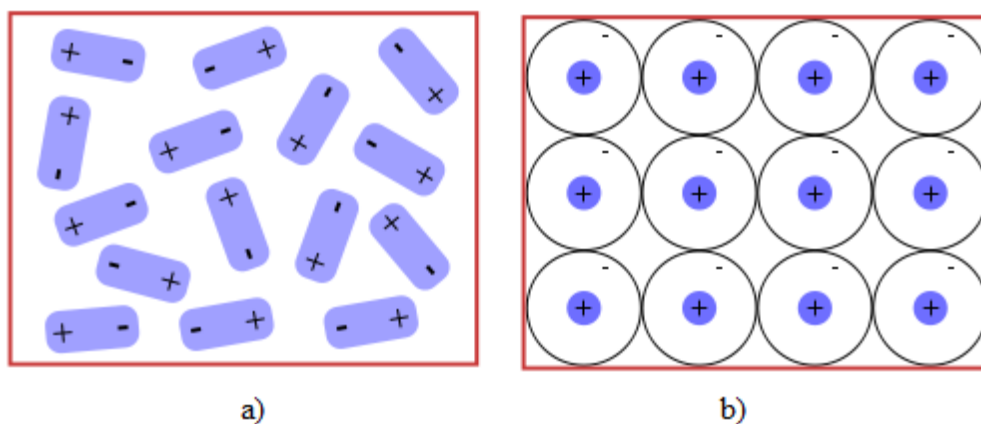
1. Polární látky

- Vznik dipólových momentů je nezávislý na vnějším elektrickém poli a je přirozenou vlastností materiálu. Po vložení do elektrického pole se dipólové momenty natáčejí ve směru jeho působení.

2. Nepolární látky

- Nepolární látky nemají dipólové momenty a mají symetrickou stavbu, která je narušena vložением do elektrického pole.

[1] [31] [32]



Obrázek 7: Rozdíl mezi a) polární a b) nepolární strukturou látky. [33] [34]. – upraveno.

POLARIZACE – dělení dle [1]

- Bez vnějšího elektrického pole.
 - Piezoelektrická, pyroelektrická a spontánní polarizace.
- S vnějším elektrickým polem a vlivem na nosiče elektrického náboje polarizace.
 - Vázané náboje.
 - Silně – elektronová, iontová a pružná dipólová polarizace.
 - Slabě – iontová relaxační a dipólová relaxační polarizace.
 - Volné náboje – migrační polarizace.

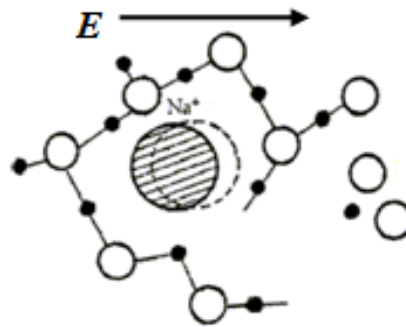
2.1.1 Deformační polarizace

Do této skupiny polarizací řadíme elektronovou, iontovou a pružnou dipólovou polarizací. Při deformačních polarizacích dochází v molekule, atomu, či krystalu k malému posunu nosiče náboje (elektron, iont, stálý dipól). Přestože je posunutí nosiče náboje malé, tak dochází k výrazné změně relativní permitivity, a to z důvodu posunu velkého množství nosičů náboje. Tyto polarizace mají velkou rychlost ustálení a vzhledem k velikosti vazebních sil nezávisí na vnějších podmínkách – teplota, tlak, apod. Navíc jsou bezztrátové, a proto se jim práce nebude věnovat. [1] [2]

2.1.2 Relaxační polarizace

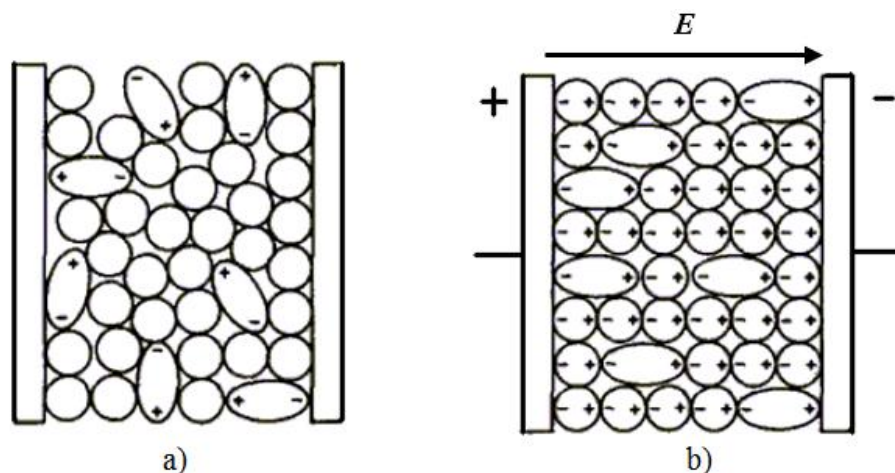
Relaxační polarizace se od deformačních odlišují v delší době ustálení, silnou teplotní závislostí větším posuvem nábojů závislejícím na struktuře látky. U kapalných a plynných dielektrik se na relaxační polarizaci podílejí slabě vázané částice. U pevných dielektrik se na nich podílejí ionty a elektrony, které se nacházejí v místech narušení látky nebo v místech s nečistotami. Díky chaotickému pohybu částí v dielektriku nedochází bez přítomnosti elektrického pole k polarizaci a slabě vázané částice mohou bez obtíží překonávat potenciálové bariéry mezi jednotlivými polohami. Po vložení dielektrika do elektrického pole se změní výška potenciálové bariéry a některé polohy se pro nosiče náboje stanou energeticky výhodnější než jiné. Dochází k nerovnoměrnému rozložení nosičů náboje v materiálu a dielektrikum získá dipólový moment. Čas, za který dojde k ustálení, se nazývá relaxační dobou a je oproti deformačním polarizacím delší (10^{-12} až 10^{-8} s). Závislost na teplotě určuje ztrátový charakter těchto polarizací. Ztráty v elektroizolačních materiálech jsou popsány ztrátovým činitelem $tg\delta$, na jehož měření je zaměřena i tato práce. [1] [2] [35]

Iontová relaxační polarizace se vyskytuje u látek složených z iontů nebo z atomů či molekul (např. volné ionty příměsí a nečistot) slabě vázaných k sousedním stavebním částicím látky. Látky podléhající této polarizaci jsou anorganická skla, keramiky se skelnou fází atd. Tento typ polarizace je závislý na frekvenci a teplotě. Na obrázku 8 je vidět, že elektrické pole \vec{E} vychýlí nečistotu v podobě kationtu sodíku (Na^+) ze stabilní polohy a naruší tak nábojové rozložení materiálu (oxid křemičitý, SiO_2). Vzniká dipólový moment. [1] [36]



Obrázek 8: Působení pole na strukturu SiO_2 při relaxační iontové polarizaci. Převzato z [36].

Dipólová relaxační polarizace se vyskytuje u polárních látek se slabou vazbou dipólových molekul (existence permanentních dipólů). Bez přítomnosti vnějšího elektrického pole jsou orientace jednotlivých dipólů zcela náhodné a jejich výskyt má stejnou pravděpodobnost. Avšak při působení vnějšího elektrického pole se jednotlivé dipóly přeskupí a jejich orientace odpovídá směru působení elektrického pole. Dipóly zaujmají energeticky výhodnou polohu. Polarizace jsou frekvenčně závislé. [1] [36]

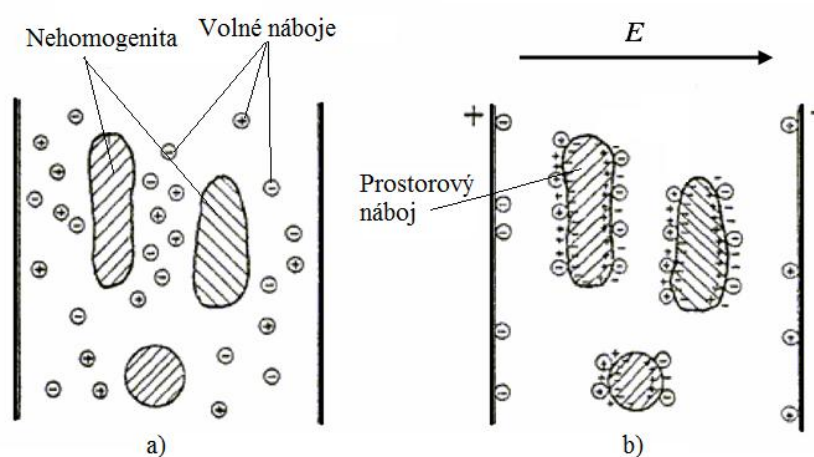


Obrázek 9: pole na strukturu polární látky při relaxační dipólové polarizaci. [36] – upraveno.

Na obrázku 9 v části a) jsou patrné molekuly s dipólovými momenty a molekuly bez něj. Po přiložení vnějšího elektrického pole b) se daný systém nasytí a všechny dipóly jsou orientovány ve směru působení elektrického pole \vec{E} . [36]

2.1.3 Migrační polarizace

Migrační polarizace se účastní silně či slabě vázané nosiče náboje a nosiče volné. Vzniká u vrstevnatých materiálů (lepenka či impregnovaný papír), u anorganických skel, keramických látek a často se vyskytuje v kompozitních materiálech. Nosiče vzniknou díky nehomogenitám (nečistoty, bublinky, prasklina apod.) v dielektriku. Migrační polarizace je, ve srovnání s výše uvedenými, pomalejší. V současné době se této polarizaci věnuje větší pozornost a je ohniskem zájmu mnoha výzkumných týmů z celého světa. Prostorový náboj se nejčastěji projevuje u vysokonapěťových zařízení se stejnosměrným napětím nebo u malých a středních frekvencí. [1] [35]



Obrázek 10: Rozložení prostorového náboje při působení elektrického pole. [36] – upraveno.

Obrázek 10 a) ukazuje rozložení volných nábojů a nehomogenit v materiálu bez vnějšího elektrického pole a b) vznik prostorového náboje v dielektriku při působení elektrického pole. [36]

2.2 Částečné výboje

K částečným výbojům dochází při provozu elektrických strojů (motory), elektrických vedení a jiných elektrických zařízení. Jde o výboje, které částečně přemostují izolaci mezi vodiči nebo mezi elektrodami o různých potenciálech. Obvykle jsou důsledkem lokálního elektrického namáhání v izolaci i v jejím okolí. Dají se popsat jako dutinky, které jsou v izolantu a narušují jeho homogenitu. Zdokonalováním výrobních technologií lze přítomnost těchto dutinek omezit, nikoliv jí však zcela zabránit. [1] [37]

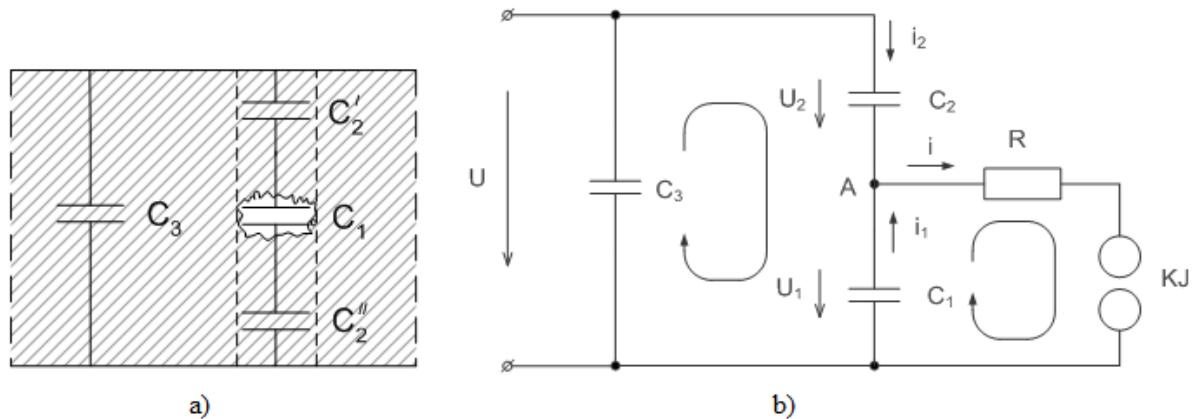
Částečné výboje se objevují jako impulzy s dobou trvání kolem 1 μ s a velice negativně ovlivňují celkové vlastnosti EIS (snižují jejich spolehlivost a životnost). Jejich působení na daný systém je: erozivní, chemické, tepelné a elektrické. Jako příklad se dá uvést regulace třífázového motoru s kroužkovou kotvou, který pracoval v podniku 30 let bez regulace. Dnešním trendem je však regulace pomocí PWM, vektorovým řízením nebo přímým řízením toku. Jde o plynulé řízení otáček motoru a zabránění vzniku velkého rozběhového proudu. Princip řízení motorů je vysvětlen v [38]. Při „rozstřídávání“ usměrněného napětí na IGBT tranzistorech ve střídači dochází k velkým napěťovým impulzům, které mají negativní vliv na izolaci motoru. Tento fakt může zapříčinit vznik částečných výbojů v materiálu a nevratné poškození izolace. Z tohoto důvodu se musí vyvíjet elektroizolační materiály eliminující vznik částečných výbojů. [37] [39]

Dělení částečných výbojů (dle [37] [39]):

- **Vnější (externí) částečné výboje**
 - Vyskytují se v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, jako např. doutnavé výboje či korónové výboje.
- **Vnitřní (interní) částečné výboje**
 - Nalezneme je v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, jako např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku.
- **Povrchové částečné výboje**
 - Nacházejí se v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika.
 - Jedná se např. o klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky v točivých strojích apod.

2.2.1 Ekvivalentní schéma vzduchové mezery v izolačním materiálu

V této kapitole bude vysvětlena výbojová činnost v elektroizolačním materiálu. Obrázek 11 ukazuje pevné dielektrikum se vzduchovou mezerou a zjednodušené schéma částečného výboje.



Obrázek 11: Germant-Philippovův model částečného výboje v dutince; a) pevné dielektrikum s vnitřní plynovou mezerou, b) zjednodušené náhradní schéma. Převzato z [37].

C_1 – kapacita dutinky

C_2 – kapacita dielektrika připojeného do série s kapacitou dutinky, $C_2 = C_2' + C_2''$

R – odpor výbojového kanálu

KJ – kulové jiskřiště (jeho zapálení představuje částečný výboj)

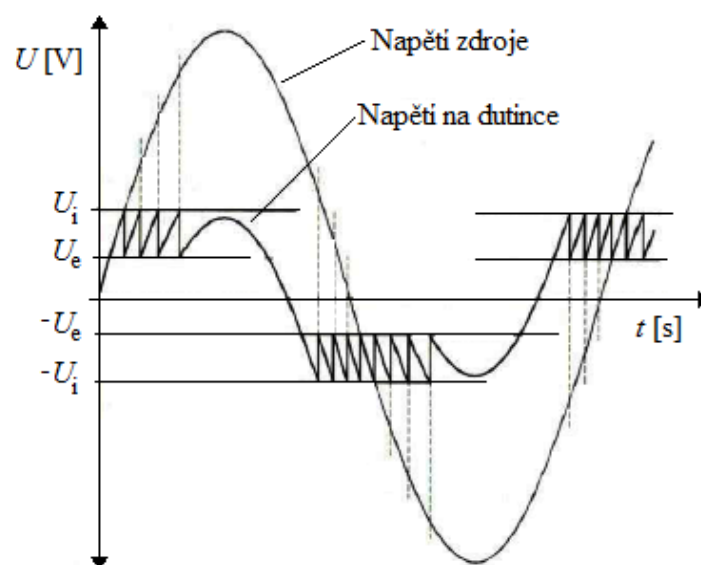
U – přiložené napětí harmonického průběhu; $U = U_m * \sin(2\pi f + \varphi)$

[1]

Vznik výbojové činnosti je způsoben rozdílným elektrickým namáháním plynu v dutince a okolního prostředí (izolant). Plyn v dutince, často vzduch, má permitivitu $\epsilon_r \cong 1$. Naopak v jejím okolí je materiál izolantu s permitivitou $\epsilon_r \geq 2,8$. Plyn v dutince 2,8 krát více namáhán přiloženým napětím, než samotný izolant. Proto dochází k průrazu plynu v dutince při nižším napětí, než je průrazné napětí okolní izolace. [1] [39]

Pachenův zákon říká, že k přeskoku nedochází ve všech dutinkách současně při stejném napětí, ale při různých napětích v závislosti na jejich velikosti. K průrazu dutinky dojde, když napětí dosáhne hodnoty průrazného napětí, které je zde nazýváno zápalným napětím U_i v souladu s normou ČSN EN 60270. Při přeskoku se neutrální molekuly plynu v dutince rozpadnou na kladné a záporné ionty. Tyto ionty se pohybují opačným směrem až ke stěnám dutinky, kde se hromadí. Na stěnách vzniká vnitřní elektrické pole dutinky mající opačnou

polaritu, než vnější pole. Vnější elektrické pole je v dutince částečně vykompenzováno. Výbojový stav v dutince končí v okamžiku nahromadění náboje na vnějších stěnách dutinky. To způsobí pokles napětí dutinky na hodnotu tzv. zhasacího napětí U_e . Výboj se neudrží a zhasíná. Jestliže se přiložené napětí stále zvyšuje, potom se zvyšuje i napětí v dutince a pokud znovu dosáhne zápalného napětí, tak se děj periodicky opakuje. Rychlost odtoku nahromaděného náboje ze stěn dutinky závisí na jejím povrchovém odporu a na vnitřním odporu izolantu. Tato rychlost určuje dobu trvání mezi dvěma po sobě jdoucími výboji v dutince. Pokud je tento interval kratší než 1 s, jedná se o nekvalitní izolant. U dobrých izolantů se výboje opakují po minutách a u výborných až po hodinách. [1] [37] [39]



Obrázek 12: Průběh napětí zdroje a průběh napětí na dutince s výboji. Převzato z [37].

U_i – Zapalovací napětí výboje.

U_e – Zhasací napětí výboje.

[37]

2.2.2 Degradální účinky částečných výbojů

Vybrané degradační účinky výbojové činnosti jsou přehledně uvedeny v následujících odrážkách.

- **Elektrické účinky**

Hořením elektrického obloku se vytvoří v izolantu vodivá dráha, která se může šířit izolantem. Při vysoké hodnotě intenzity elektrického pole může dojít k čistě elektrickému průrazu. Negativní vliv má také bombardování povrchu pevného (resp. kapalného) izolantu ionty a elektrony při výboji. [1] [37] [39]

- **Erozivní účinky**

Eroze dutinky způsobená výboji a bombardováním. Dochází k neustálému narušování jejích stěn, což může vést k průrazu izolantu. [1] [37] [39]

- **Chemické účinky**

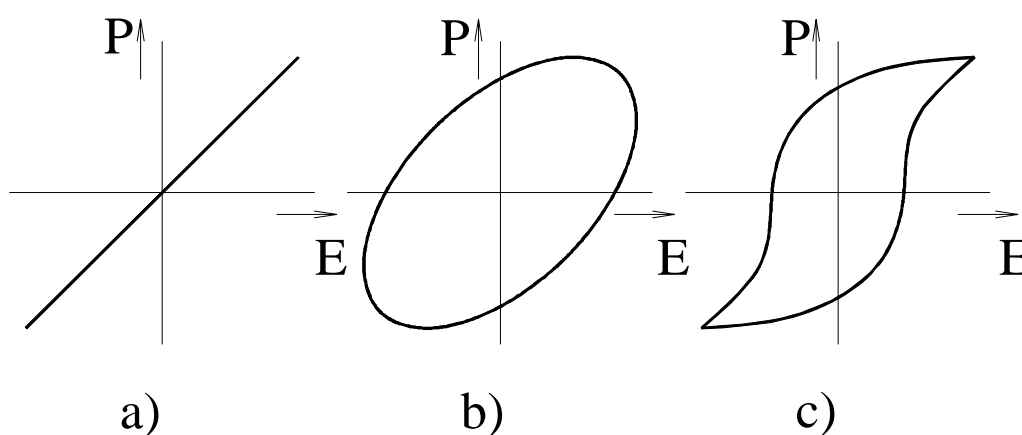
Při výbojích dochází k chemickým změnám přítomných plynů. Pokud je dutinka vyplněna vzduchem, pak nastávají jeho změny na dusík a ozón. Vzniká tzv. aktivní dusík, který je mnohem reaktivnější než klasický dusík. Vzniknuvší ozón má významné oxidační účinky. Dále vznikají oxidy dusíku NO_x , které společně se vzdušnou vlhkostí vytvářejí dusíkaté kyseliny. Tyto chemické reakce zapříčiňují uvolnění viditelného světla a ultrafialového (UV) záření (nebezpečné pro izolant). [1] [37] [39]

- **Tepelné účinky**

Teplota při výboji dosahuje vysokých hodnot působících na stěny dutinky a může dojít k zuhelnatění izolantu. Přímým následkem částečných výbojů může být tepelná nestabilita, neboť s rostoucím počtem výbojů se zvětšuje teplota a klesá elektrická pevnost. EIS se také může hůře ochlazovat, což zkrátí jeho životnost. [1] [37] [39]

2.3 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty se vyskytují v izolantech při střídavém i stejnosměrném napětí nehledě na tvar napěťové křivky. Při provozu izolantu se s časem mění jeho objemová struktura. Z hlediska funkčnosti se jedná o nežádoucí jev spojený se vnikem tepla vedoucímu až k destrukci izolantu. Vznik tepelné energie se nazývá dielektrickými ztrátami. Jejich příčinou je přítomnost nehomogenit ve struktuře látky, pohyby volných a vázaných nábojů. Majoritní podíl mají ztrátové polarizace a částečné výboje. Jak jednotlivé polarizační mechanismy přispívají k dielektrickým ztrátám lze vyčíst z následujícího grafu, kde je znázorněna závislost vektoru polarizace \vec{P} na intenzitě elektrického pole \vec{E} . [1] [36]



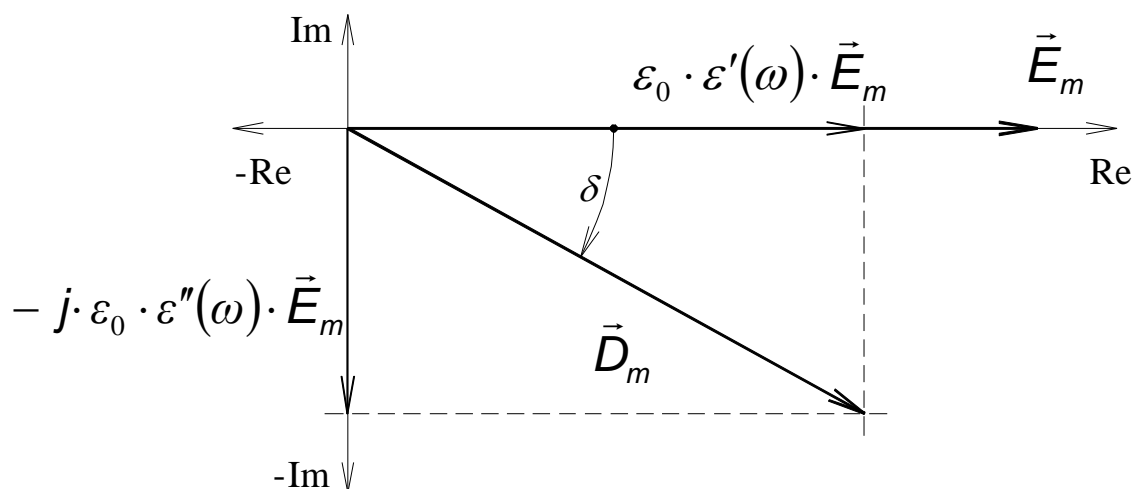
Obrázek 13: Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole. Převzato z [1].

V části obrázku 13 s označením a) jsou ztráty při pružných polarizacích – bez ztrát. Pokud se vyskytují pružné i relaxační polarizace, tak se jedná o část b) a ztráty vyobrazeny jako plocha pod grafem. Pro feroelektrické látky platí část c). Při překročení Curierovy teploty látka ztratí feroelektrické vlastnosti a platí oblast b). [1] [36]

2.3.1 Dielektrikum ve střídavém poli

Před vstupem do problematiky samotných dielektrických ztrát by bylo dobré se nejprve podívat, jak se dielektrikum chová ve střídavém poli. Dielektrikum vložené do střídavého elektrického pole vykazuje zcela jiné vlastnosti než v poli stejnosměrném. Při působení střídavého pole sinusového průběhu dochází, vlivem kinetické energie polarizovaných částic, k posunu vektoru elektrické indukce $\vec{D}(t)$ za vektorem intenzity elektrického pole $\vec{E}(t)$. Toto zpoždění je vyjádřeno úhlem δ . Výsledný posun vektorů není ovlivněn pouze kmitočtem

střídavého napětí, ale také permitivitou prostředí. $\varepsilon'(\omega)$ v reálné části je vlastní relativní permitivita látky a $\varepsilon''(\omega)$ v imaginární části určuje velikost ztrát vzniklých při namáhání ve střídavém poli. Poměrem těchto permitivit lze získat vztah pro tzv. ztrátový činitel $tg\delta$. [1]



Obrázek 14: Grafické znázornění posunu vektoru elektrické indukce za vektorem intenzity elektrického pole. Převzato z [1].

Poměrem reálné a imaginární permitivity lze získat vztah pro tzv. ztrátový činitel $tg\delta$:

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} [-] \quad (1)$$

[1]

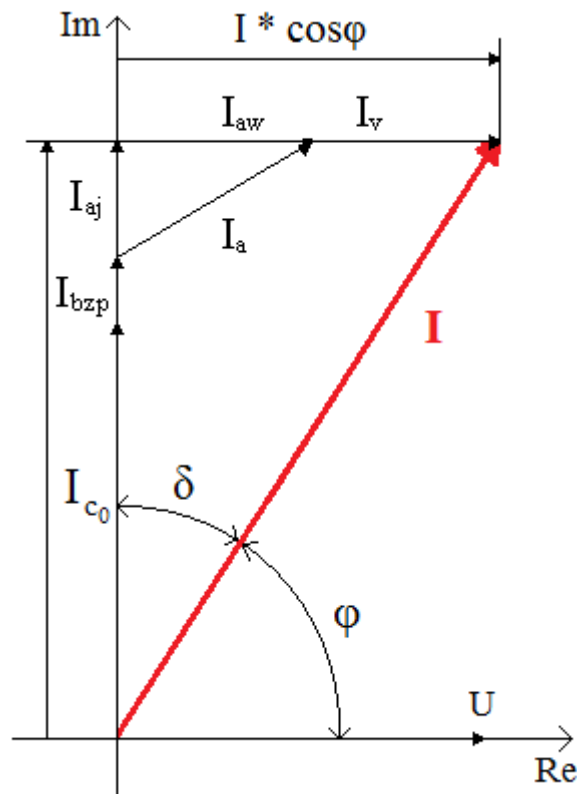
2.3.2 Ztrátový činitel

Při studiu dielektrických ztrát ve střídavém poli se nejvíce uplatňuje ztrátový úhel δ , jež je dán zpožděním elektrické indukce za intenzitou elektrického pole. V praxi je tato závislost vyjádřena ztrátovým činitelem $tg\delta$. Dielektrické ztráty je možno určit pomocí ztrátového výkonu P_z . V bezztrátovém prostředí by byl úhel posunutí napětí a proudu roven 90° , ale v reálu je tento úhel zmenšen o úhel ztrátový. Tuto závislost je možno znázornit do fázorového diagramu reálného dielektrika. [1]

Celkový proud I (červený) se rozloží do jednotlivých složek: I_{c_0} – nabíjení geometrické kapacity dielektrika, I_{bzp} – bezztrátové polarizace, I_a – absorpční proud symbolizující pomalé polarizace s činnou složkou I_{aw} a jalovou složku I_{aj} , poslední složkou je vodivostní

proud I_V , který je způsoben nenulovou vodivostí materiálu. Z fázorového diagramu lze odvodit vztah pro ztrátový výkon (viz [1]). [1]

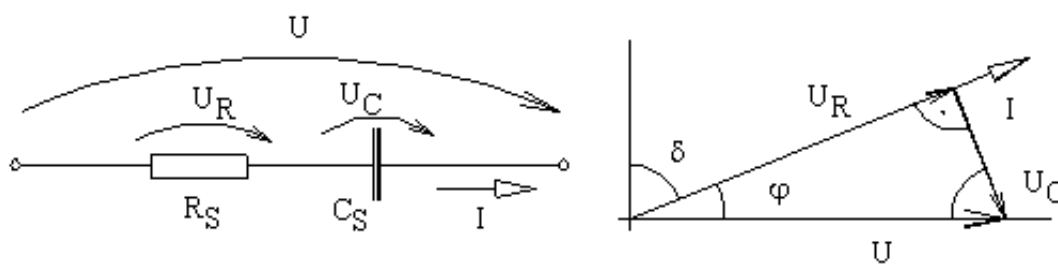
$$P_Z = \omega * C * U^2 * \operatorname{tg} \delta \text{ [W]} \quad (2)$$



Obrázek 15: diagram pro reálné dielektrikum. [1] – upraveno.

Při předpokladu lineárních pochodů v dielektriku je možno pro popis ztrát využít ekvivalentní náhradní obvody – sériový a paralelní. Tyto obvody se dají použít pouze při laicizování podmínek, protože reálné děje jsou daleko složitější. [1] [36]

• **Sériové náhradní schéma**



Obrázek 16: Schéma sériového náhradního obvodu a fázorový diagram. Převzato z [1].

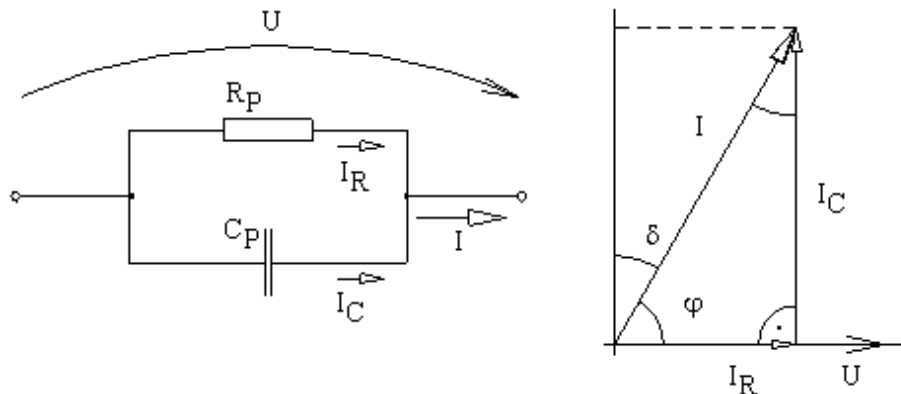
Tento náhradní obvod je vhodný pro kondenzátor se ztrátami z odporů přívodů a elektrod. Dielektrikum je prakticky bezztrátové. Ztrátový činitel a výkon lze vyjádřit následujícími vztahy:

$$tg\delta = \omega * C_S * R_S [-], \tag{3}$$

$$P_Z = \frac{\omega * C_S * U^2 * tg\delta}{1 + tg^2\delta} [W] \tag{4}$$

[1]

• **Paralelní náhradní schéma**



Obrázek 17: Schéma paralelního náhradního obvodu a fázorový diagram. Převzato z [1].

Paralelní náhradní schéma je vhodné použít pro případ řešení ztrát v reálném kondenzátoru v širokém frekvenčním pásmu. Ztrátový činitel a výkon lze vyjádřit následujícími vztahy:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega * C_P * R_P} [-], \tag{5}$$

$$P_Z = \omega * C_P * U^2 * tg\delta [W] \tag{6}$$

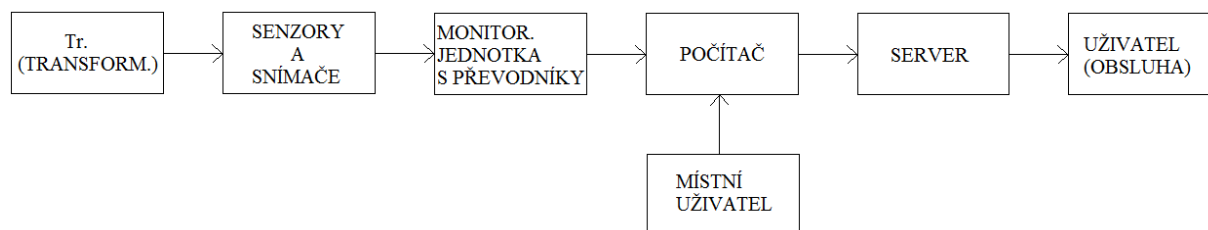
[1]

3 Elektrotechnická diagnostika

Elektrotechnická diagnostika je spojujícím článkem mnoha procesů. Při konstrukci elektrotechnického zařízení dochází k provázání mnoha disciplín, základem je však materiálové inženýrství, které zajišťuje potřebné prvky pro daný účel – výběr materiálů. Na základě diagnostických šetření se posuzuje schopnost materiálu sloužit svému účelu. Pokud diagnostikovaný materiál nevyhovuje svými strukturálními vlastnostmi, tak musí dojít jeho modifikaci či výměně za jiný. Samozřejmostí je, že elektrotechnická diagnostika nesouvisí pouze s materiálovým inženýrstvím, ale také s procesním řízením a technologickými procesy. Z hlediska provádění vlastních diagnostických šetření existují dva způsoby, jak objekt zkoumat. Offline diagnostika – zkoumaný objekt je mimo provoz (tzv. testovací diagnostika) a online diagnostika – zkoumaný objekt je v provozu (tzv. funkční diagnostika). [37]

3.1 Online diagnostika transformátorů

Transformátory řadíme ke klíčovým prvkům v energetické soustavě, a proto je nutné zajistit jejich spolehlivost a bezporuchový chod. Významnou roli tedy hraje elektrotechnická diagnostika, které je nutno věnovat patřičnou pozornost při výrobě a provozu zařízení. [37]



Obrázek 18: Blokové schéma monitorovacího systému. [37] – upraveno.

Blokové schéma znázorňuje funkční diagnostický systém. Vše začíná u měřeného transformátoru, který se dle měřené veličiny osadí senzory a snímači. Signály ze senzorů a snímačů je nutné pomocí převodníků převést do digitální podoby, aby mohly být zpracovány v počítači. Takto získané výsledky vyhodnocuje místní uživatel, nebo jsou ukládány na server. Koncovým článkem celého procesu je vždy obsluha, která na základě získaných výsledků rozhoduje je o dalším provozu zařízení. [37]

Monitorovací systém sbírá a vyhodnocuje data nepřetržitě. Hlavními cíli je odhalení slabých míst v izolační soustavě a její celková degradace. Obecně by měl monitorovací systém plnit následující funkce:

- Non-stop sledování diagnostický veličin.
- Podávat varovná hlášení při překročení limitních hodnot a dělat přímé zásahy do řídicího systému.
- Ukazovat aktuální stav zařízení.

[37]

Pro včasné podchycení závady je důležité sledovat části transformátoru s největším rizikem vzniku poruchy. Jde o aktivní části (vinutí a magnetický obvod) a elektroizolační systém. Závadu v transformátorech může způsobit hned několik faktorů: rozpuštěné plyny v oleji, přítomnost kyslíku, obsah vlhkosti a teplota. Teplota je považována za hlavní omezující parametr, navíc z ní vychází i učení zbytkové životnosti transformátoru. Základní sledované veličiny: výstupní napětí a proud pro každou fázi, obsah plynů v oleji, vlhkost oleje a teplota (oleje, vinutí a chladiče). [37]

3.1.1 Měření napětí a proudu

Měřením provozních napětí a proudů lze získat veličiny potřebné pro určení okamžitého zatížení transformátoru. Zatěžovací proud také určuje velikost Joulových ztrát ve vinutí, čímž lze odhadnout velikost tepelného zatížení. Měření proudu v jednotlivých fázích se provádí měřicími transformátory umístěnými na kondenzátorových průchodkách. Nezbytnou nutností je vhodný převodník. Ke komunikaci se používá rozhraní RS 232 nebo Profibus. [37]

3.1.2 Měření teploty

- **Olej**

Důsledkem nadměrného tepelného namáhání izolačního systému olej – papír je rychlé stárnutí transformátoru a větší pravděpodobnost výskytu poruchy. K tepelnému stárnutí izolace dochází při všech teplotách. Výjimkou je pouze teplota -273 °C (absolutní nula, kdy ke stárnutí nedochází a životnost je nekonečná). [37]

Měření teploty probíhá v horní části transformátorové nádoby, protože teplota oleje je zde vyšší než v dolní části. Používají se tzv. jímkové odporové teploměry, jež se řadí mezi

kontaktní snímače (v přímém kontaktu s olejem). Fungují na principu změny odporu v závislosti na teplotě okolí. Součástí teploměrů bývá i vestavěný převodník převádějící teplotu na proudový signál 4 až 20 mA. Častěji se využívá přenos po datových sběrnicích. [37]

- **Vinutí**

Pro přímé měření teploty vinutí se využívají systémy založené na optických vláknech. V transformátorech je čidlo zabudováno do každého vinutí a povrch optického vlákna je vyroben z teflonu. Optovláknové teploměry pracují na různých principech. Nejvíce využívanou metodou je sledování změn v absorpčním spektru polovodiče GaAs nebo měření úbytku intenzity fluorescence teplotně citlivého fosforu. [37]

3.1.3 Další online měření

V dalším bodě bude uvedeno několik online měřících metod pro transformátor pracující na vn a vn. Důležitým parametrem je Hot-Spot [37] teplota (nejteplejší místo). Poměrem životnosti při Hot-Spot teplotě a teplotě referenční lze určit stárnutí izolace. Výsledkem je relační rychlost stárnutí za jednotku času. Podrobněji oteplování transformátorů věnuje norma ČSN EN 60076-2ed. 2 [40]. Olej (minerální, syntetický, rostlinný) v transformátoru plní nejen funkci izolantu, ale také chladiwa celého systému. Z tohoto důvodu je nezbytné sledovat jeho cirkulaci, obsah vody a jeho výšku v dilatační nádobě. Vlivem vysoké teploty dochází v minerálních olejích k porušení vazeb uhlíků a vodíků. Výsledkem jsou nestabilní fragmenty, které spolu reagují a rekombinují v molekuly plynu jako např. ethylen, acetylen, methan, či ethan. Tyto plyny mají neblahý vliv na izolační systém a mohou vyústit ve ztrátu izolační schopnosti systému olej – papír. [37]

3.2 Online diagnostika velkých točivých strojů

Do kategorie velkých točivých strojů řadíme turboalternátory, hydrogenerátory nebo vysokonapěťové motory. Tyto elektrické stroje slouží v energetických jednotkách, jakými jsou elektrárny, podniky těžkého průmyslu, apod. To je také důvod, proč jsou kladeny vysoké nároky na jejich bezporuchový provoz. Je pochopitelné, že během provozu působí na zařízení velké množství vlivů majících za následek postupnou deterioraci. Stárnutí dělíme do těchto skupin: mechanické, chemické (zejména koroze), elektrické a kombinované (koroze pod napětím). Jak bylo již zmíněno, tak offline diagnostická šetření se provádějí zejména při výrobě a mají za úkol otestovat parametry, které se nedají určit za chodu stroje. Offline diagnostika zahrnuje: měření izolačního odporu statorového a rotorového vinutí, zkoušky na různých napěťových hladinách a frekvencích, určení ztrátového činitele $tg\delta$ při zvyšujícím se napětí, teplotě nebo frekvenci. Na měření ztrátového činitele je zaměřen experiment v závěru práce. Online diagnostika má oproti offline velkou výhodu, že ukazuje okamžitý stav zařízení a predikuje jeho další stav, čímž lze zabránit vzniku závady. Její nevýhodou mohou být vyšší investiční náklady. Podívejme se na některé metody pro funkční diagnostiku. [37]

3.2.1 Měření hluku

S provozem elektrických točivých strojů je vždy spojen hluk. Elektromagnetický hluk způsobuje chvění kostry nebo jiných částí stroje, na které působí elektromagnetické síly. V ložiscích nebo rotujících částech stroje vzniká mechanický hluk a chodem ventilátoru ventilační hluk. Diagnostika hluku nesleduje jen aktuální hodnoty akustického tlaku, ale sleduje trend jejich změn – hladina akustického tlaku a změna frekvenčního spektra. Právě tyto změny mohou indikovat poruchu nebo opotřebení některých částí. [37]

3.2.2 Vibrace čel vinutí

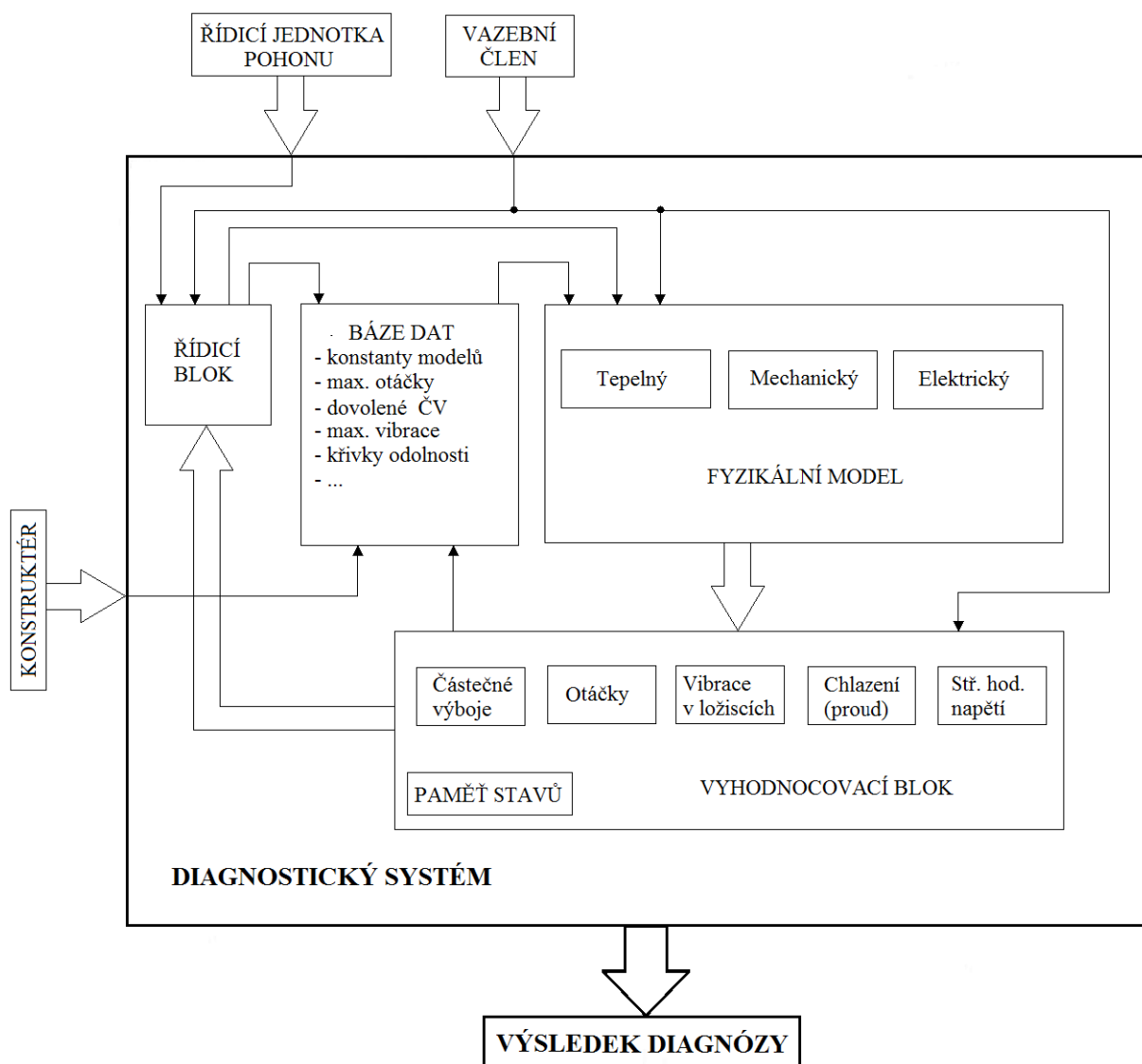
Vibrace v čelech statorového vinutí mohou způsobit poruchy generátorů (turboalternátor, hydrogenerátor). Senzory k těmto účelům používané se nazývají akcelerometry, jejichž výstupem je elektrický signál přímo úměrný velikosti vibrací. Obvykle se zapojují dva senzory, z nichž jeden snímá vibrace v radiálním a druhý v tangenciálním směru, což umožňuje lepší představu o chvění daného místa. Monitorování vibrací čel vinutí patří mezi jednu z nejdražších technik online diagnostiky velkých točivých strojů. [37]

3.2.3 Další online měření

Dalšími veličinami, které lze získávat přímo při běhu stroje bez nutnosti jeho odpojení jsou napětí, proud, otáčky apod. Při provozu velkých točivých strojů dochází k velkému teplotnímu namáhání izolace, což může způsobit ionizaci vzduch a vznik ozónu. Pro jeho detekci se využívá jeho chemických vlastností, konkrétně reakce s jinými prvky např. kolorimetrická metoda využívající reakce ozónu v chloroformovém prostředí nebo fotometrická metoda, kdy vzniklý ozón absorbuje záření UV záření. Více podrobností o těchto metodách v [37]. Dále bývá realizována frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického toku. Během provozu asynchronního stroje může dojít k nesymetrii v elektrickém a magnetické obvodu. Tyto nesymetrie mohou zapříčinit vznik parazitních momentů působících proti směru otáčení. Frekvenční analýza se provádí za chodu stroje a nevyžaduje žádné zásahy do obvodu. Provádí se také měření rozběhového proudu, částečných výbojů, nebo analýza mazacího oleje v ložiscích tzv. tribodiagnostika. [37]

3.3 Online diagnostika malých točivých strojů

Schéma ukazuje online diagnostický systém menšího pohonu s asynchronním motorem.



Obrázek 20: Diagnostický systém s asynchronním motorem. [37] – upraveno.

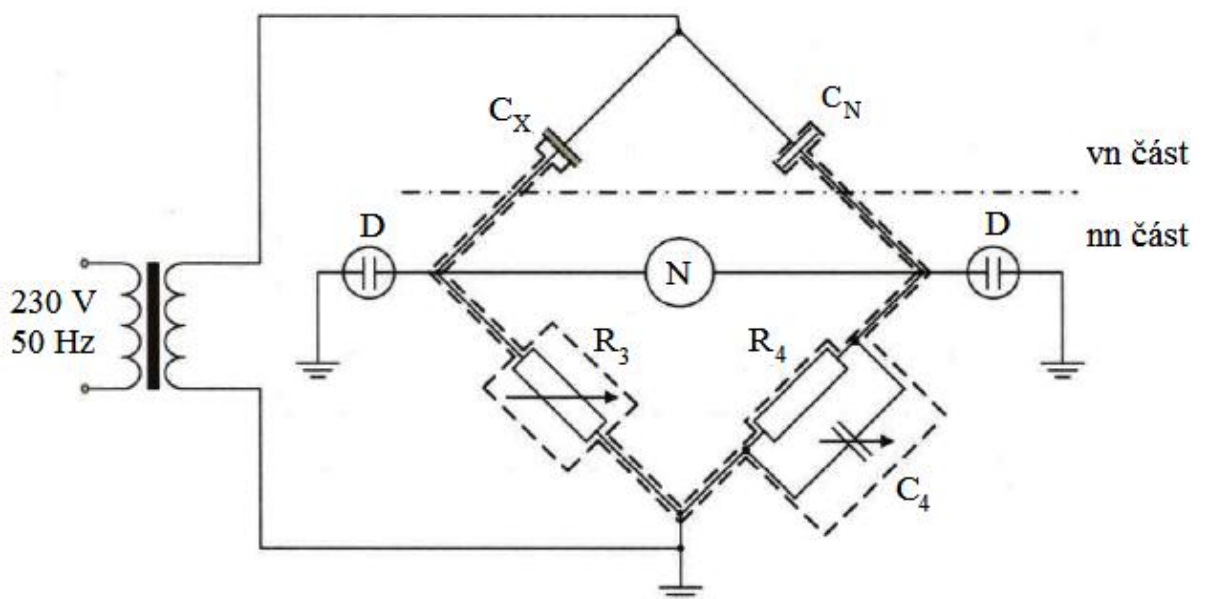
Řídicí jednotka dostává aktuální informace o pohonu, požadovaných otáčkách a momentu přes vhodné převodníky ve vazebním členu. Naměřená data pro modely stárnutí směřují do fyzikálních modelů, kde je počítána zbytková životnost pohonu. Ve vyhodnocovacím bloku dochází k porovnání momentálního stavu sledovaných veličin s jejich maximální hodnotou. Informace jsou zpracovány a důležité hodnoty se uloží do paměti stavů. Probíhá vyhodnocování a porovnávání výsledků rozhodovacích procesů s databází uložených hodnot. Výsledná data se zpětnou vazbou předají řídicímu bloku a mohou být použity k upřesnění báze dat. Podle výsledků měření může řídicí jednotka upravit výkon, nebo pohon odstavit. Výsledky diagnózy jsou poslány uživateli přes sběrnici či bezdrátově. [37]

3.4 Měření ztrátového činitele

Měření ztrátového činitele se provádí změnou působících parametrů. Pokaždé vzniknou jiné charakteristiky – frekvenční, ztrátová (změna napětí) nebo teplotní, na které je založen pokus v závěru práce. S měřením ztrátového činitele je úzce spojeno i měření relativní permitivity ϵ_r . Nejčastější metodou pro měření $tg\delta$ je tzv. Scheringův můstek. Jednotliví výrobci se snaží tuto metodu co nejvíce automatizovat, aby došlo k eliminaci chyb vzniklých lidským faktorem. [1] [37]

3.4.1 Scheringův můstek

Scheringův můstek byl patentován v roce 1920 německý profesorem fyziky Haraldem Scheringem. Můstek se skládá ze dvou částí – vysokonapěťové, kde je umístěn zkoušený vzorek a z části nízkonapěťové sloužící k vyvážení můstku. Galvanické oddělení vn a nn části zajišťuje měřený vzorek s neznámou kapacitou C_X . K němu je přiložen kapacitní normál C_N , jehož kapacita je 95,63 pF a má zanedbatelné ztráty $tg\delta < 10^{-5}$. Napětí dodávané zdrojem musí mít sinusový průběh a nesmí být v oblasti měření zdrojem výbojů. Pokud by při zkoušení došlo k eventuálnímu průrazu vzorku, tak jsou v uzlových bodech diagonály umaštěny svodiče přepětí s označením D. Můstek se vyrovnává v nízkonapěťové části odporovou dekádou R_3 a kapacitní dekádou C_4 . Vyrovnání můstku značí nulový indikátor označený písmenem N. Nízkonapěťová část obsahuje stínění, jež ji chrání před negativními vlivy parazitních elektromagnetických polí. [37] [43]



Obrázek 21: Scheringův můstek. [1] – upraveno.

Z důvodu usnadnění výpočtu ztrátového činitele při frekvenci 50 Hz je volen $R_4 = \frac{1000}{\pi}$ a výpočet ztát vychází ze schématu pro sériový náhradní obvod. Pro vyrovnaný můstek platí tyto vztahy:

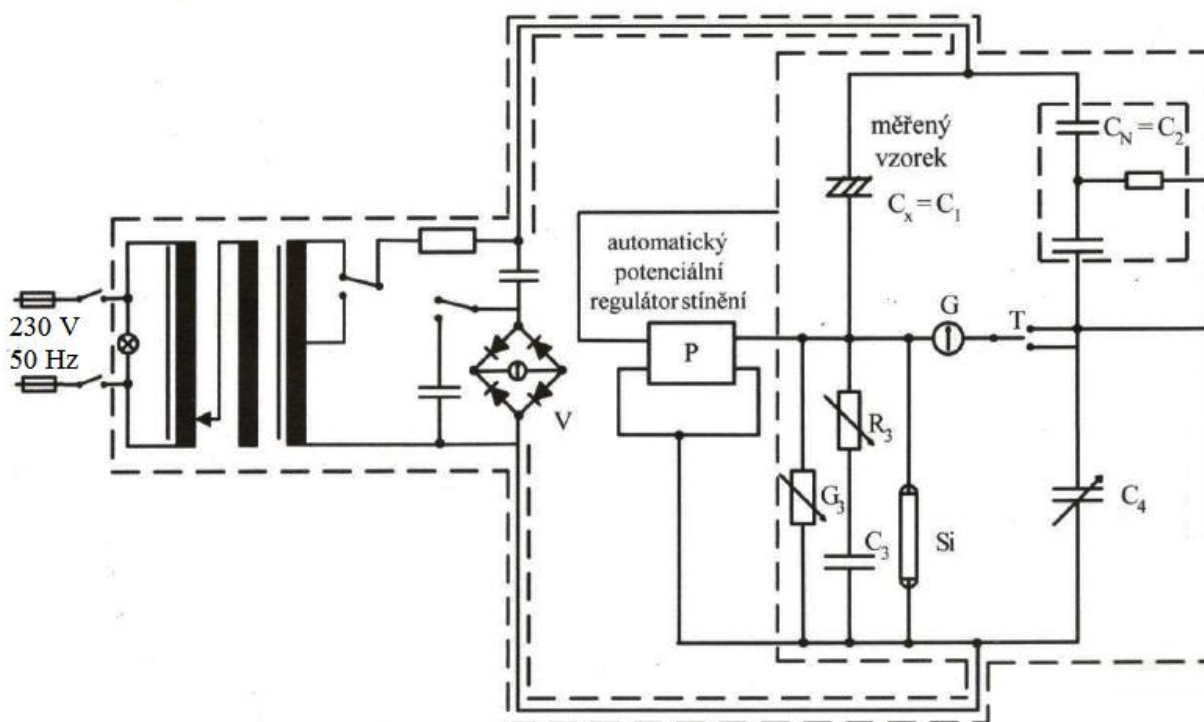
$$C_S = C_X = C_N * \frac{R_4}{R_3} \text{ [F]}, \quad (7)$$

$$\text{tg} \delta = \omega * C_S * R_S = \omega * C_4 * R_4 = 0,1 * C_4 \text{ [-]} \quad (8)$$

[1]

3.4.2 Čtyřkapacitní Scheringův můstek

Čtyřkapacitní Scheringův můstek je modifikací výše uvedeného. Rozdílem jsou kapacity zvyšující impedanci jednotlivých větví, což zlepšuje citlivost a přesnost měření. Schéma tohoto můstku je na následujícím obrázku.



Obrázek 22: Schéma zapojení čtyřkapacitního Scheringova můstku. [1] – upraveno.

Můstek má vlastní napájecí zdroj dodávající napětí (maximálně 2 kV) sinusového tvaru a kmitočtu 50 Hz. Můstek je vybaven stíněním s poloautomatickým potenciálním regulátorem, který slouží k eliminaci parazitních kapacit přívodů a měřených vzorků. Regulátor je ve své podstatě zesilovač 1:1 s velkou vstupní a malou výstupní impedancí a při vyrovnaní můstku

automaticky přivede jeden uzel diagonály na nulový potenciál. Tím je eliminován vliv kapacity přívodů k uzlům můstku proti zemi. Můstek se nuluje pomocí nulového indikátoru s regulovatelnou citlivostí. Měřená hodnota kapacity C_X se vyrovnává přes kapacitní dekádu C_4 . Ztráty ve vzorku se vyrovnají odporovou R_3 (ukazuje $tg\delta$) a vodivostní dekádou G_3 . Velikost ztrátového činitele $tg\delta$ a kapacity C_4 se odečte přímo z vyrovnaných prvků můstku. Kapacitní normál ($C_N = 100 * \pi$ [pF]) je bezztrátový. Je-li můstek vyrovnán, pak se výsledná kapacita se určí z následujícího vztahu:

$$C_X \text{ [pF]} = C_N \text{ [pF]} * \frac{C_3 \text{ [\mu F]}}{C_4 \text{ [\mu F]}} = 100 * \pi * \frac{1}{\pi} * \frac{1}{C_4} = \frac{100}{C_4 \text{ [\mu F]}} \quad (9)$$

[1] [37]

Při měření ztrátového činitele pomocí čtyřkapacitního Scheringova můstku lze vypočítat relativní permitivitu měřeného vzorku. Při použití dotykových elektrod má vzorec následující tvar:

$$\epsilon_r = \frac{C_X}{C_0} \text{ [-]} \quad (10)$$

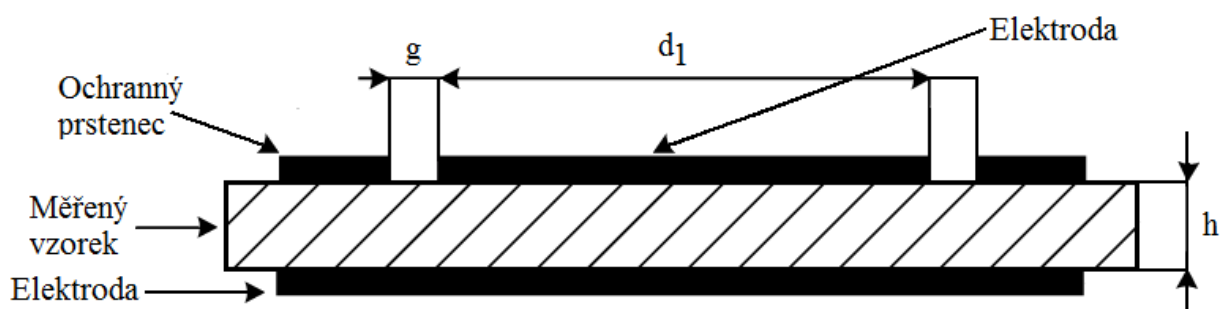
[1]

C_0 [pF] je přímá mezielektroková kapacita. Při použití diskové elektrody s ochranným prstencem nezvažujeme opravu na okrajovou kapacitu $C_e = 0$. K určení velikosti přímé mezielektrokové kapacity platí vztah:

$$C_0 = \epsilon_0 * \frac{A}{h} = 0,08854 * \frac{A}{h} \text{ [pF]}, \quad (11)$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (d_1 + g)^2 \text{ [cm}^2\text{]}, \quad (12)$$

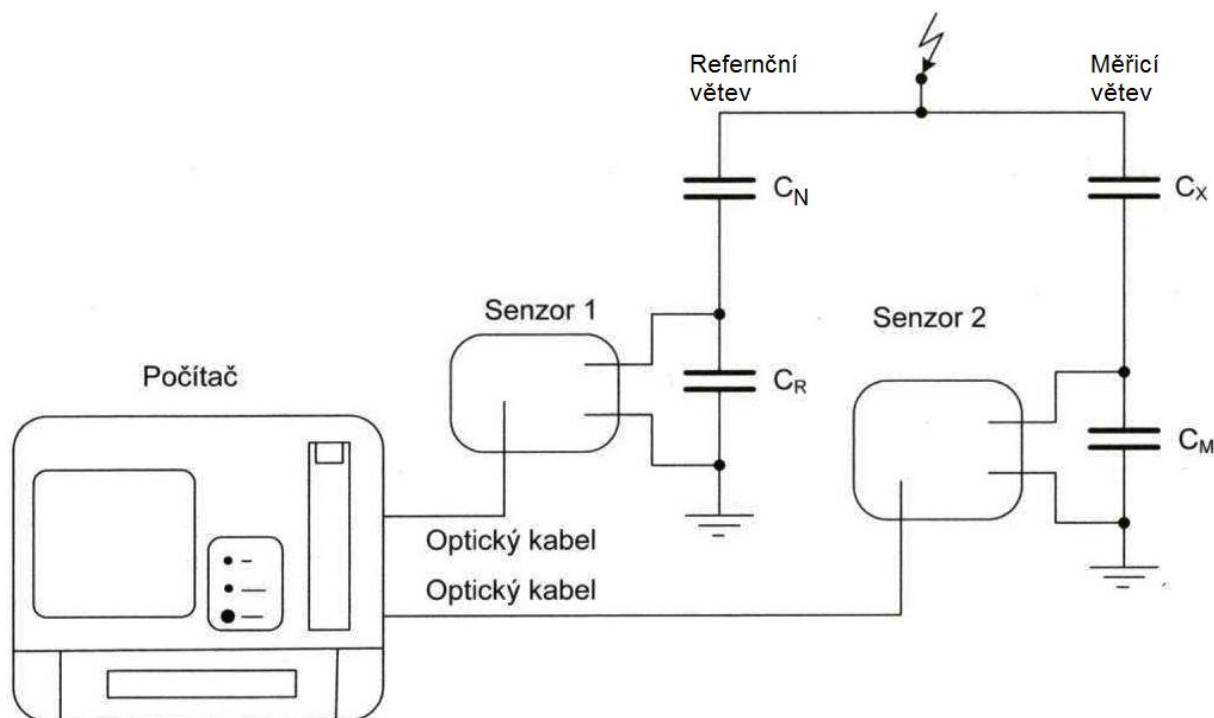
kde ϵ_0 [F/m] je permitivita vakua, A [cm²] je přepočet plochy elektrod, h je tloušťka měřeného vzorku, d_1 je průměr elektrody, g je vzdálenost mezi elektrodami. [1]



Obrázek 23: Schéma diskové elektrody s ochranným prstencem. [2] – upraveno.

3.4.3 Automatizovaný Scheringův můstek

Automatický Scheringův můstek je založen na principu „klasického“. Rozdílem je princip výpočtu měřených veličin pomocí počítače a jejich zobrazení na displeji ($tg\delta$, C_X , ε , atd.). [1]

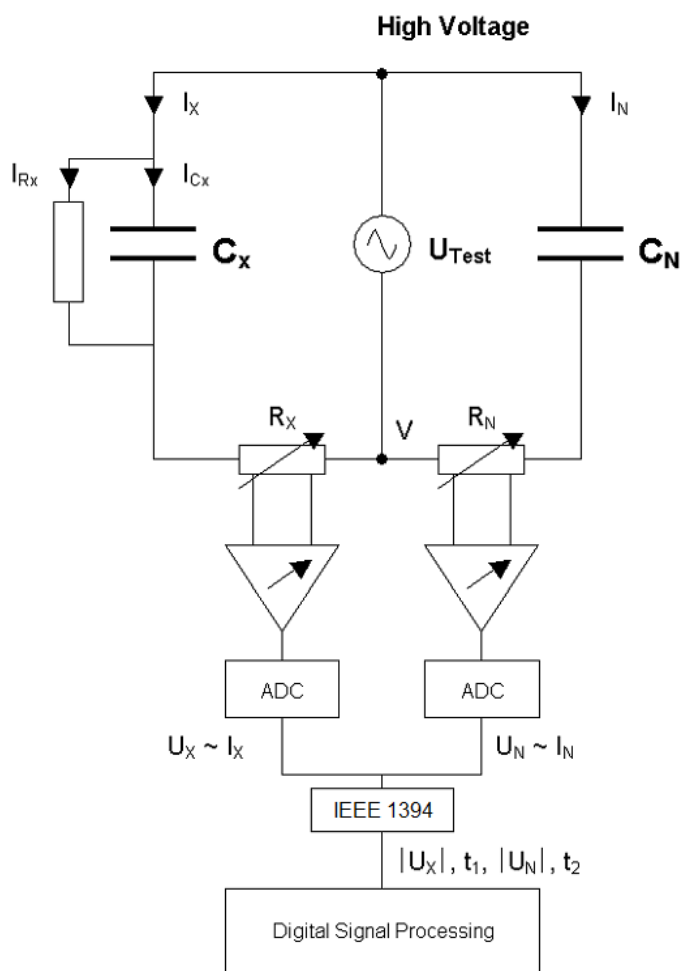


Obrázek 24: Schéma zapojení automatické modifikace Scheringova můstku. [37] – upraveno.

Jednotlivé větve můstku jsou kapacitní dělič vysokonapěťových kapacit (C_N a C_X) a nízkonapěťových kapacit (C_R a C_M). Na rozdíl od konvenčního provedení můstku, nemusí být plně vyvážen, protože se měří fázový úhel mezi napětími na hrubě nastavených nízkonapěťových kapacitách. Dělicí poměry měřicí a referenční větve jsou určeny poměrem C_R a C_M . Jelikož nemusí být můstek plně vyvážen, lze v nízkonapěťových větvích použít také odpory, ale je nutné být zřetel na parazitní rozptylové kapacity. Proto se více používají kondenzátory, které vznik rozptylových kapacit eliminují. Z dělicího poměru měřené větve se určí kapacita měřeného vzorku C_X . Senzory 1 a 2 snímají napětí na nízkonapěťových kapacitách a dle jejich fázového posunu se určí ztrátový činitel $tg\delta$. Všechny hodnoty ze senzorů se přes optické kabely přenášejí do počítače, kde dojde k jejich zpracování a zobrazení na displeji přístroje. [37] [44]

3.4.4 Dvojvektorová měřicí metoda

Dvojvektorová měřicí metoda se od předcházejících liší tím, že se nezakládá na principu Scheringova můstku. Princip spočívá v měření proudu I_N přes známou referenční kapacitu C_N (velmi nízké ztráty $tg\delta < 10^{-5}$) a na měření proudu I_X přes neznámou kapacitu C_X zkoušeného vzorku. Paralelní odpor měřené kapacity značí její ztráty. Referenční a měřicí větve jsou napájeny ze zdroje vysokého napětí se sinusovým tvarem a frekvencí 50 Hz, které je v obrázku označeno U_{Test} . Protékající proudy jsou měřeny na bočnicích a R_X a R_N a následně se digitalizují v analogově digitálním převodníku ADC. Pomocí datové sběrnice IEEE 1394 se všechna digitální data označí v čase. Díky této technologii lze velice rychle a přesně měřit patřičné veličiny, ale také získat informaci o fázovém posunu mezi proudy I_X a I_N . Digitalizovaná a označená data se přivádějí do počítače, kde se vyhodnocují a mohou být **zaznamenána online**. Počítač a zdroj vysokého napětí jsou buď externí, nebo přímo zabudované v měřicí jednotce. Například výrobek firmy HAEFELY TEST AG s označením Tettex 2830/2831 mají tyto části již zabudovány v sobě. [45] [46]

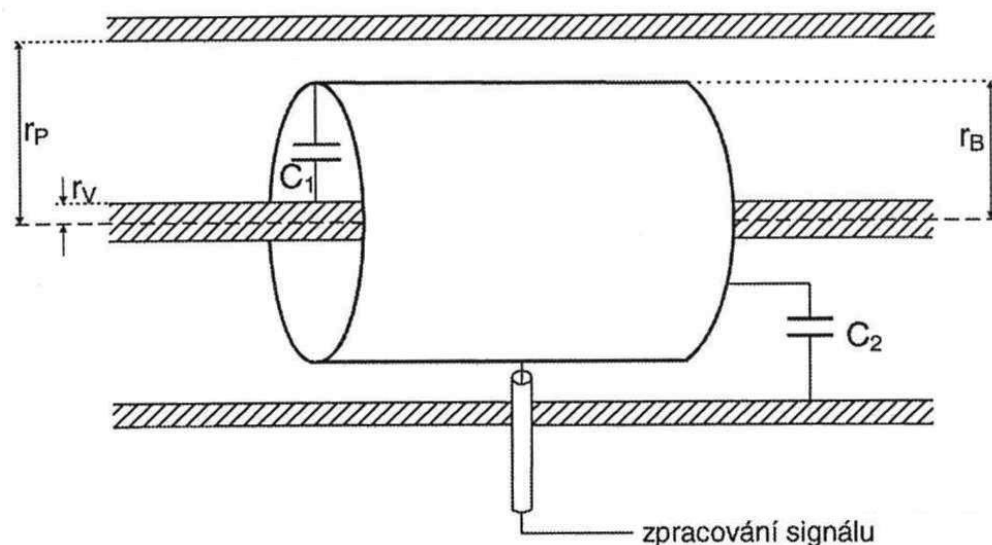


Obrázek 25: Dvojvektorová měřicí metoda. [45] – upraveno.

3.5 Online měření částečných výbojů

Online měření částečných výbojů přímo detekuje výbojovou činnost ve statorovém vinutí stroje za normálního provozu. Dnes je monitorování částečných výbojů využito pro sledování elektrických točivých strojů řízených pomocí PWM, vektorovým řízením nebo přímým řízením toku. [37] [38]

Nejpoužívanější metodou pro měření částečných výbojů online je využití vysokonapěťových kondenzátorů instalovaných v každé fázi stroje. Tyto kondenzátory slouží jako snímače a jsou citlivé na vysokofrekvenční signály vyvolané částečnými výboji. Snímaný rozsah frekvencí je od několika hertzů do jednotek gigahertzů. Důležité je, aby použité snímače nebyly citlivé na frekvenci napájecího napětí a její harmonické. Nejčastěji používanou kapacitní sonda je sonda koaxiálního typu na obrázku 26. Kapacitní sondy se nejvíce využívají na kabelových koncovkách, v zapouzdřených rozvodnách a pro lokalizaci částečných výbojů v systémech s epoxidovou pryskyřicí. Nevýhodou je nemožnost určit elektricky odstíněné zdroje částečných výbojů. [37]



Obrázek 26: Schéma kapacitní sondy. [37] – upraveno.

K určení jednotlivých kapacit slouží následující vztahy:

$$C_1 = \frac{2 * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r * l}{\ln \frac{r_b}{r_v}} \text{ [F]}, \quad C_2 = \frac{2 * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r * l}{\ln \frac{r_p}{r_b}} \text{ [F]}, \quad (13)$$

kde l je délka sondy, r_v je poloměr vodiče, r_b je poloměr snímače, r_p je poloměr vnějšího pláště kabelu. [37]

3.6 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je důležitým parametrem každého EIS charakterizující jeho schopnost oddělení dvou míst s různým potenciálem a zabránění průchodu proudu mezi nimi. Důležitou roli mají okolní podmínky, skupenství materiálu a přiložené elektrické pole.

Po přiložení napětí překračujícího povolenou mez dochází k prudkému nárůstu koncentrace volných nosičů elektrického náboje a jejich pohybu. Důsledkem je prudký pokles rezistivity a izolační schopnosti a konduktivity materiálu. Tento proces končí výbojem, kdy se původně dvě různá místa s odlišným potenciálem spojí vodivou cestou, kterou teče zkratový proud. V důsledku výboje může dojít ke vzniku a hoření elektrického oblouku. Ve druhém stádiu po odeznění vlastního výboje se objeví následné degradační účinky. Aspekty ovlivňující degradační účinky jsou struktura materiálu a výkon zdroje. Dochází k velkému nárůstu teploty, ionizačním procesům a intenzivnímu záření. Tyto jevy vedou ke značné degradaci EIS a také k poškození materiálů v jeho okolí. Elektrickou pevnost lze určit ze vztahu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ [V/m]}, \quad (14)$$

kde U_p [V] je přiložené napětí a d [m] je tloušťka izolantu. [1] [37]

- **Průraz**

O průrazu lze hovořit v případě pevných izolantů. Jde o jev, kdy dochází k přeskoku napětí mezi elektrodami (pokles) a průtoku proudu. Následkem je trvalé degradace (často i destrukce) izolačních schopností materiálu. Tento aspekt působí problémy zejména při laboratorním testování elektrické pevnosti pevného izolantu, protože nelze analyzovat vybraný vzorek vícekrát. S tím souvisejí i rostoucí náklady na experimenty a větší počet vzorků. [1]

- **Přeskok**

Dochází k němu u plynného nebo kapalného izolantu. Jako u průrazu dojde k poklesu napětí a nárůstu proudu. Diametrálním rozdílem je, že při přeskoku nedochází k trvalému zhoršení izolačních vlastností, jako u pevných EIS, ale pouze k dočasnému. Plynné a kapalné EIS mají totiž vlastnost regenerace. [1]

3.6.1 Typy průrazů

Typy průrazů izolačních materiálů jsou rozebrány v následujících odrážkách.

- **Čistě elektrický průraz**

Při takovém průrazu nezávisí průrazné napětí na teplotě ani na délce působení přiloženého napětí. V nejslabším místě namáhaného objektu je energie elektrického pole tak velká, že způsobí jeho okamžitou destrukci. Pokud vyloučíme ohřev izolantu a procesy stárnutí způsobené vlivem teploty a elektrického pole můžeme zvažovat tento druh průrazu. [1]

- **Tepelný průraz**

Jak již název napovídá, tak se jedná o průraz způsobený ohřevem celého elektroizolačního systému. Ohřev je nerovnoměrný v celém objemu. Právě v místech s vyšší teplotou dochází ke vzniku velkých dielektrických ztrát a zvýšení elektrické vodivosti. K průrazu dochází, pokud není EIS schopen uchládit sám sebe. To je způsobeno přivedením většího napětí, než je dovoleno. [1]

- **Elektrochemický průraz**

Tento typ průrazu se projeví, pokud na izolant působí elektrické pole po dlouhou dobu. Elektrochemické procesy naruší strukturu materiálu, a tím se výrazně sníží jeho elektrická pevnost. Stárnutí izolantu má za následek větší pravděpodobnost strukturálních změn. Změny jsou reverzibilní (vratné) nebo ireverzibilní (nevrátne). Jedním z rozhodujících faktorů při výběru vhodného EIS je jeho odolnost vůči působení provozních činitelů. K elektrochemickému průrazu může dojít v různě dlouhých časových intervalech provozu (dny, měsíce, roky). [1] [32]

3.7 Vodivost a izolační odpor

Reálný izolační materiál, na rozdíl od ideálního, obsahuje vlivem znečištění a příměsí, malé množství volných nosičů elektrického náboje. Z tohoto důvodu není elektrická vodivost nulová. Pro hodnocení materiálů z hlediska jejich vodivosti jsou důležité dvě veličiny – rezistivita ρ a konduktivita γ . Jejich vztah je následující:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} [\text{S} * \text{m}^{-1}] \quad (15)$$

[1]

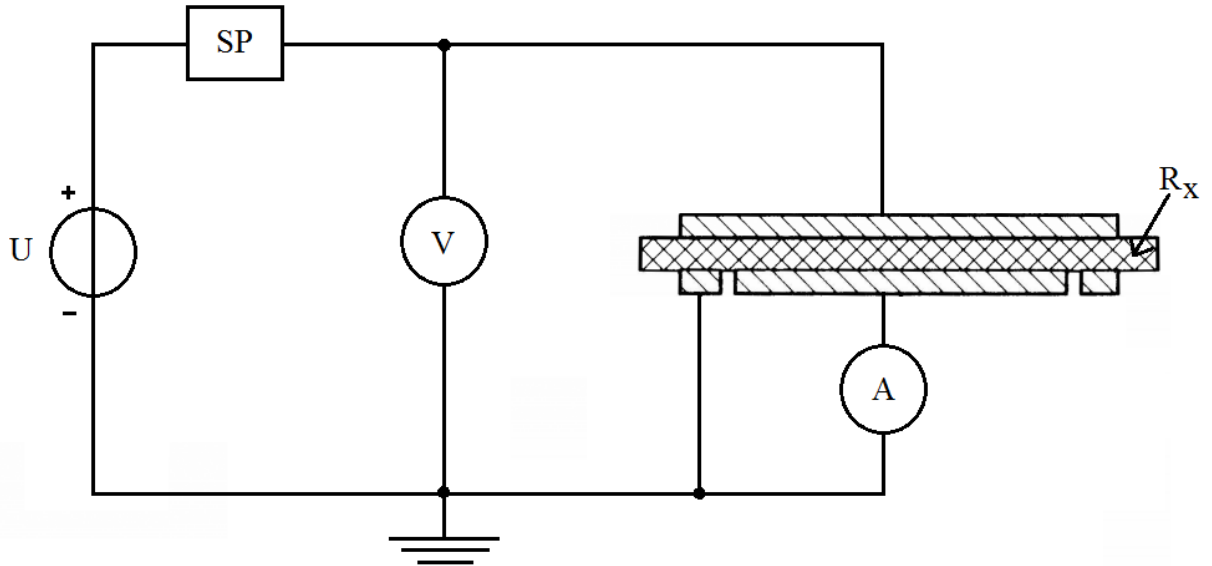
Pro výpočet rezistivity plochého vzorku v homogenním elektrickém poli existuje vztah:

$$\rho = R * \frac{S}{d} [\Omega * \text{m}], \quad (16)$$

kde $S [\text{m}^2]$ je plocha elektrod přiložených na vzorek, $d [\text{m}]$ je tloušťka vzorku a $R [\Omega]$ okamžitá hodnota izolačního odporu vzorku vypočítaná z Ohmova zákona. Pro získání rezistivity je nutné hodnotu odporu přepočítat na rozměry zkoušeného vzorku. Při tomto pokusu nelze porovnávat izolační odpory, ale pouze rezistivity. Pro porovnání izolačních odporů bychom museli všechny vzorky měřit za stejných podmínek. [1]

- **Měření izolačního odporu**

O měření izolačního odporu pojednává norma ČSN IEC 167 [47]. Nejčastěji se provádí voltampérovou metodou (V-A) nebo metodou Wheatsonova můstku. Obě metody jsou popsány v [1].



Obrázek 27: měření izolačního odporu V-A metodou. [1] - upraveno.

Voltampérová metoda je doporučena normou ČSN IEC 93. Schéma V-A metody je na obrázku 27 (U – zkušební napětí, SP – spínač, V – voltmetr, A – ampérmetr). Vzorek se umístí mezi dvě elektrody a sepnutím spínače se uzavře obvod. Výsledný izolační odpor je dán poměrem přivedeného napětí na elektrody a celkového proudu mezi nimi – Ohmův zákon ($R_x = \frac{U}{I}$). Hodnoty napětí a proudu se odečítají po jedné minutě. [1]

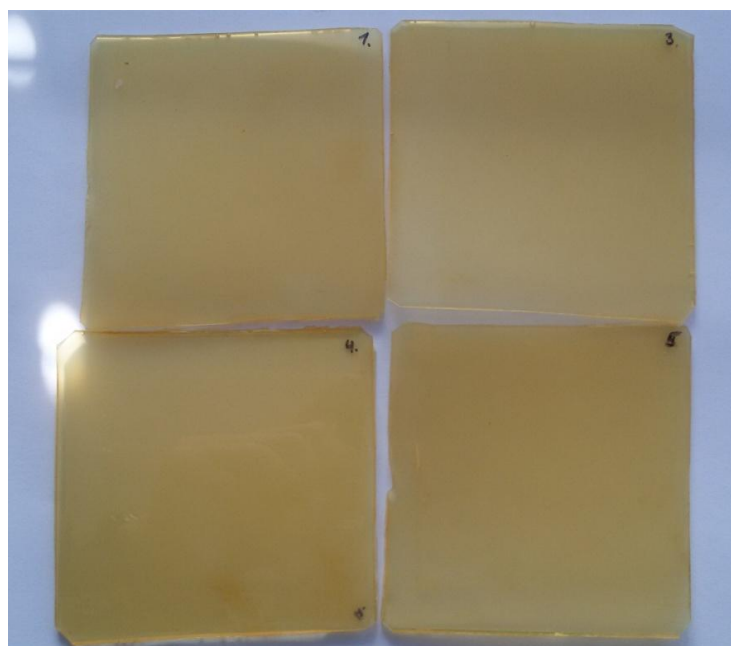
4 Experiment

Poslední část práce se zabývá experimentálním porovnáním dvou metod pro měření ztrátového činitele. Princip spočívá v měření $tg\delta$ vzorků kompozitního materiálu Epoxylite®, konkrétně TSA 220 + 1,25 % SiO₂. Pro měření byly použity přístroje Tettex 2830/2831 a Tettex 2821/RR od švýcarské firmy HAEFELY TEST AG. Jednotka Tettex 2821/RR funguje na principu čtyřkapacitního Scheringova můstku a Tettex 2830/2831 měří pomocí dvojvektorové měřicí metody. Princip obou metod byl vysvětlen v předchozí kapitole.

Výstupem z experimentu má být graf závislosti ztrátového činitele na vzrůstající teplotě a jejich následné porovnání a zhodnocení. Rozsah teplot: $\Delta t = 30\text{ °C} \div 110\text{ °C}$ s krokem po 10 °C a testovací napětí $U = 500\text{ V}$ (50 Hz). Každý vzorek byl jednou změřen na přístroji Tettex 2830/2831 a dvakrát na Tettex 2821/RR. Protokoly s výsledky jednotlivých měření jsou k dispozici v příloze.

- **Epoxylite® TSA 220**

Jedná se o epoxidovou pryskyřici používanou v systémech VPI. Má vynikající elektroizolační schopnosti a výbornou teplotní odolnost třídy 220 (R). Často se využívá v trakčních motorech. Dle datasheetu má při teplotě 20 °C ztrátový činitel $tg\delta = 0,003$. Jednotlivé vzorky jsou označeny čísly 1, 3, 4, 5. Číslo 2 nebylo k dispozici, protože na něm byly prováděny jiné zkoušky a měření. [48]



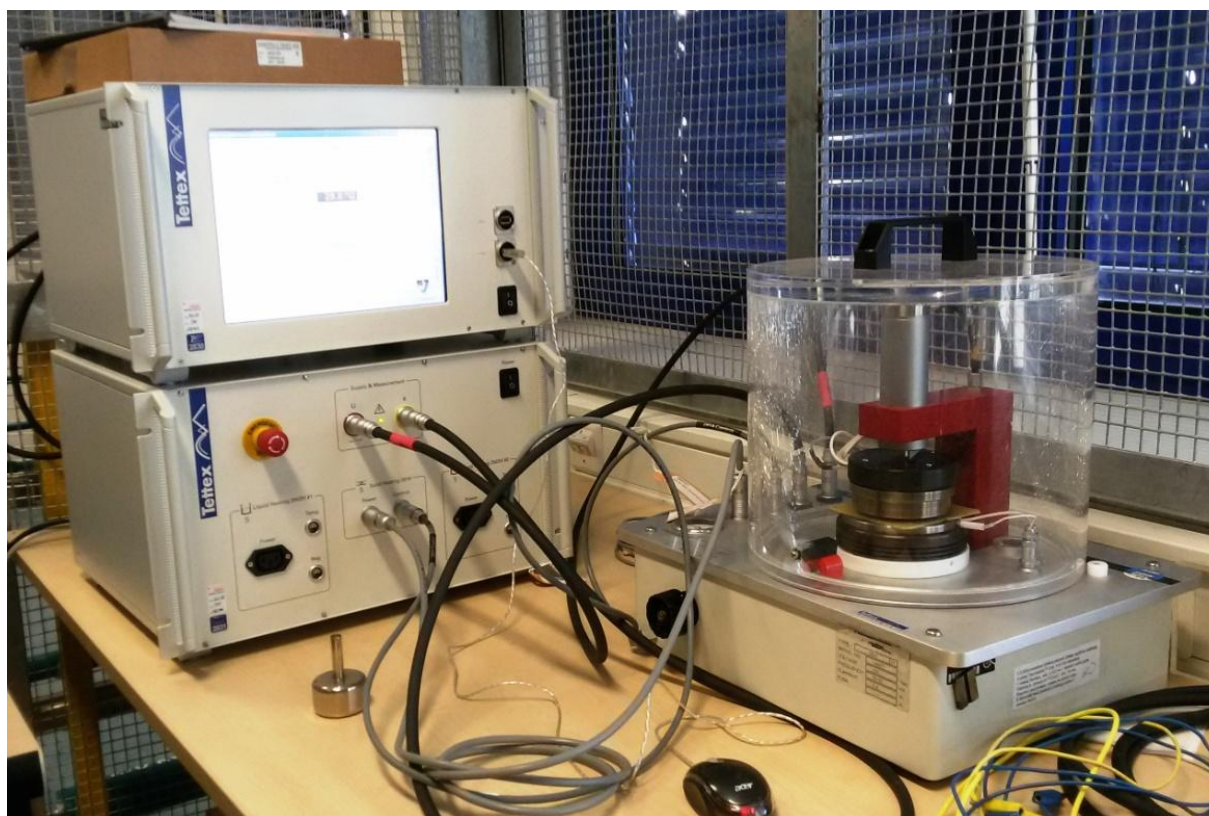
Obrázek 28: Měřené vzorky.

4.1 Postup měření

Následující část práce pojednává o jednotlivých postupech měření při experimentu.

4.1.1 Tettex 2830/2831

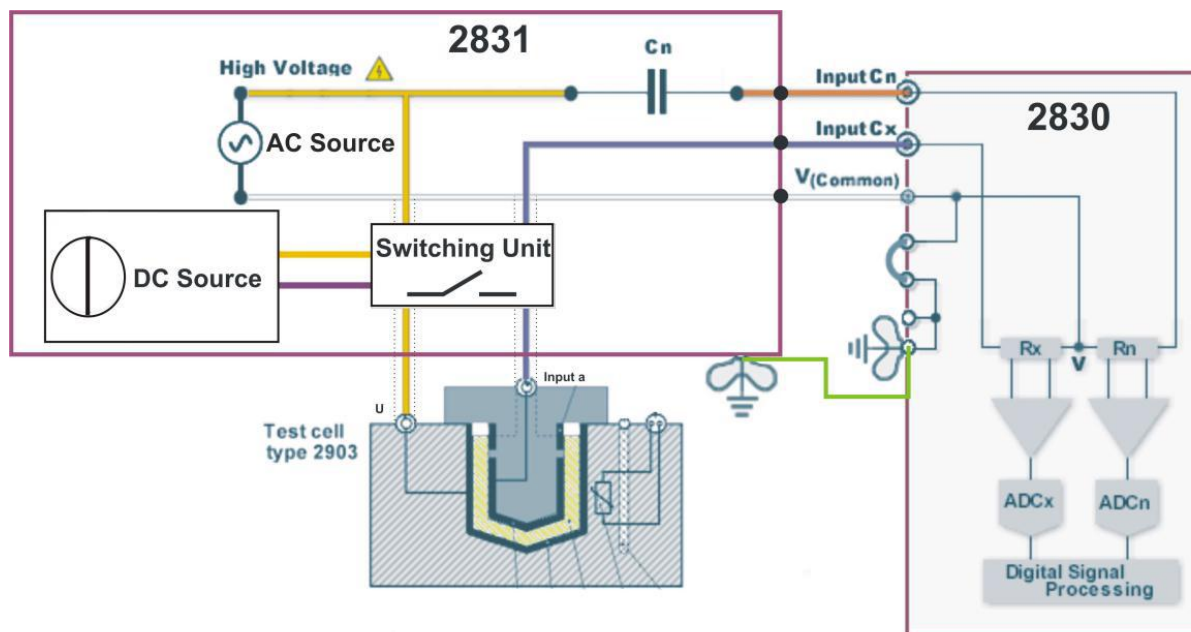
Před měřením byla u každého zkoušeného vzorku pomocí digitálního mikrometru učena jeho tloušťka na osmi místech. Ze získaných hodnot byl vypočten aritmetický průměr, který byl následně zadán do počítače na jednotce 2830. Bez této informace by nebylo možné úspěšně provést měření. Zkušební vzorky byly umístěny do elektrodového systému, tak aby plocha obou elektrod přiléhala na zkoušený vzorek. Následně byly elektrody přitaženy k sobě silou 3 N/cm^2 . Poté byla zvyšována teplota od $30 \text{ }^\circ\text{C}$ do $110 \text{ }^\circ\text{C}$ a při navýšení teploty o $10 \text{ }^\circ\text{C}$ se provedlo měření. Po dokončení experimentu byl vzorek vyjmut z elektrodového systému a nechal se vychladnout.



Obrázek 29: Měření pomocí Tettex 2830/2831.

Na obrázku 29 je vidět kompletní zapojení přístroje. V pravé části obrázku je vidět propojení elektrodového systému s jednotkou Tettex 2831 (spodní). V elektrodovém systému je umístěn měřený vzorek s neznámou kapacitou C_X . Jednotka 2831 obsahuje zdroj střídavého

napětí a referenční kapacitu C_N . Jednotka Tettex 2830 (horní) se skládá ze zbytku můstku pro měření pomocí dvojitého vektoru (bočníky, A/D převodníky, sběrnice a systém k vyhodnocení dat), na její čelní straně je umístěn monitor s dotykovým displejem. Jak je patrné, tak přes elektrodotový systém je položena nádoba bránící nahodilému dotyku elektrod v době měření. Pokud není ochranná nádoba přesně položena na svém místě, tak není možné zahájit měření.

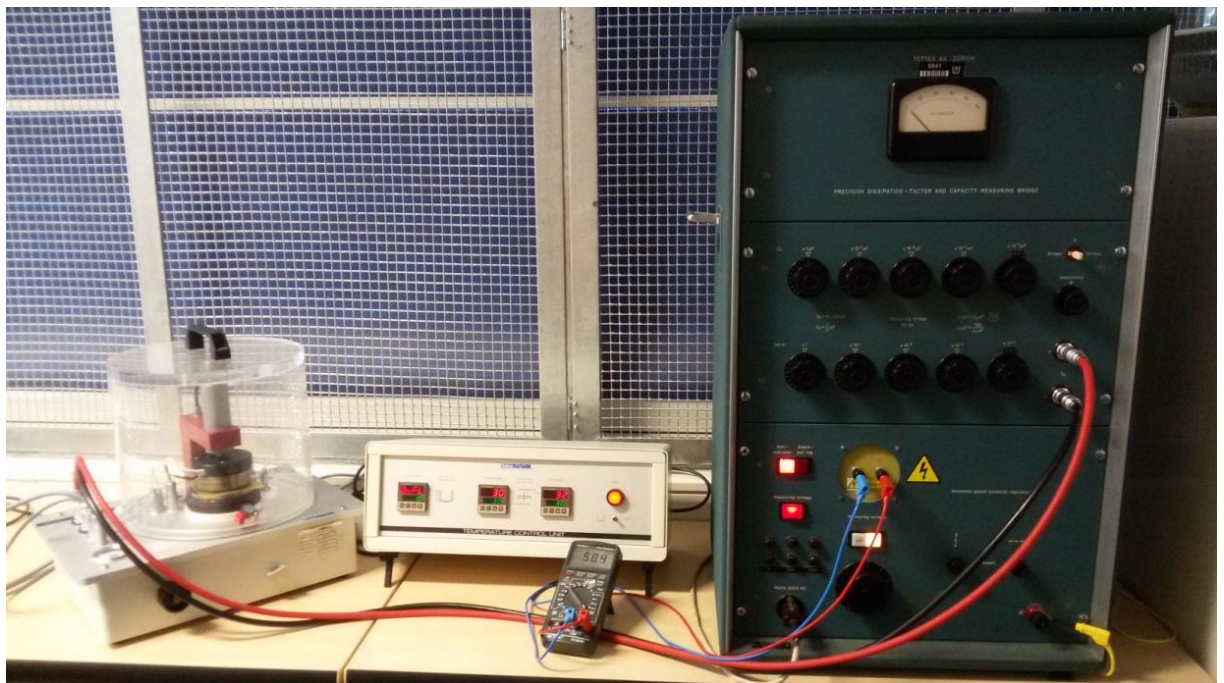


Obrázek 30: Vnitřní schéma přístrojů Tettex 2830/2831. Převzato z [45].

Vnitřní schéma přístrojů Tettex 2830/2831 ukazuje rozmístění jednotlivých částí měřicího systému. Připojený elektrodotový systém (na obrázku 30 označeno – Test cell type 2903), ale neodpovídá měření pevných izolantů, nýbrž kapalných. Elektrodotový systém pro měření pevných izolačních materiálů má označení Tettex 2914.

4.1.2 Tettex 2821/RR

Měření s použitím přístroje Tettex 2821/RR probíhalo stejným způsobem. Již zjištěnou tloušťku vzorku je možno využít pro zjištění mezielektrodové kapacity a následně relativní permitivity. Samotné měření neprobíhalo automaticky. Nejprve musel být můstek, pomocí kapacity C_4 na kapacitní dekádě a dekádě se ztrátovým činitelem, vynulován. K vynulování můstku dojde, pokud se při největší citlivosti dostane ručička nulového indikátoru na nulu. Následně se z hodnot na dekádách odečte kapacita C_4 (pro výpočet neznámé kapacity C_X) a ztrátový činitel $tg\delta$.



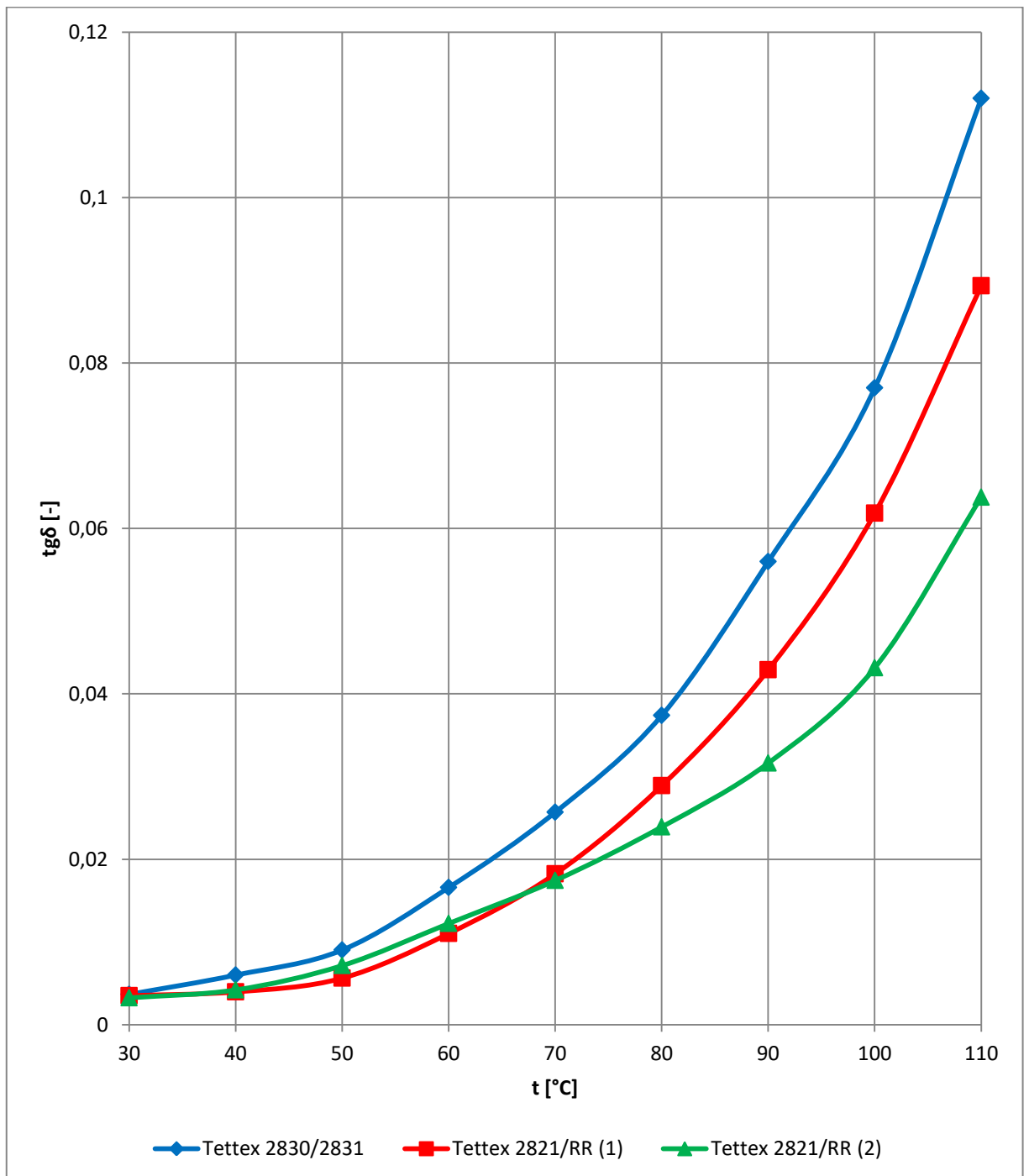
Obrázek 31: Měření pomocí Tettex 2821/RR.

V levé dolní části obrázku je vidět stejný elektrodový systém jako v předešlém případě. Uprostřed je umístěn P – regulátor teploty elektrodového systému. Před ním je multimetr ukazující aktuální hodnotu testovacího napětí. Čtyřkapacitní Scheringův můstek je v pravé části obrázku. Uprostřed horní části můstku je vidět nulový indikátor, v prostřední části jsou umístěny dekády pro vyvážení a regulátor citlivosti. Ve spodní části se nachází propojení s elektrodovým systémem a připojení multimetru.

4.2 Výsledné grafy

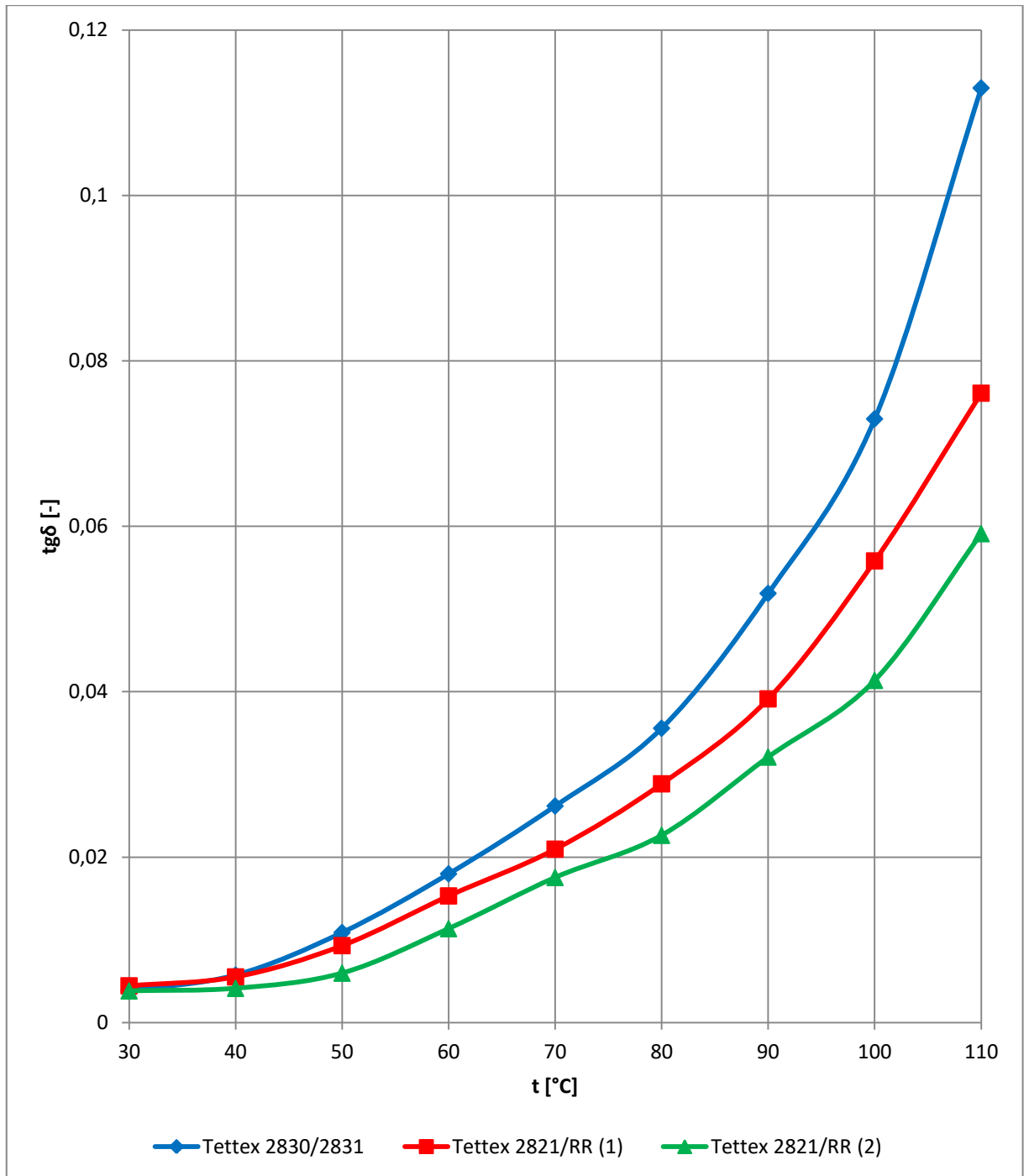
Z naměřených hodnot byly získány výsledné grafy závislosti ztrátového činitele na zvyšující se teplotě. ($\text{tg}\delta = f(t)$).

- Vzorek č.: 1



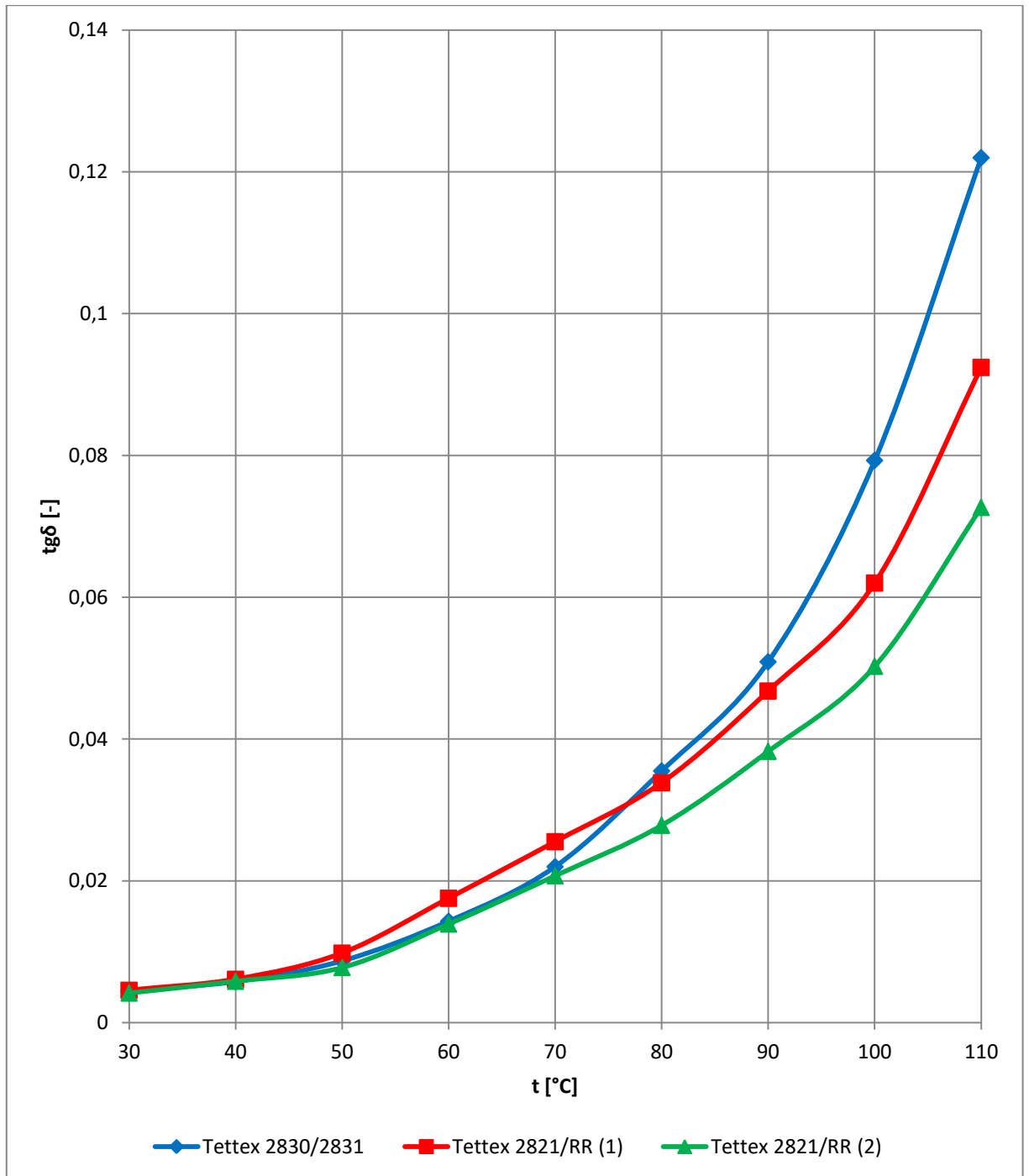
Obrázek 32: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 1).

• Vzorek č.: 3



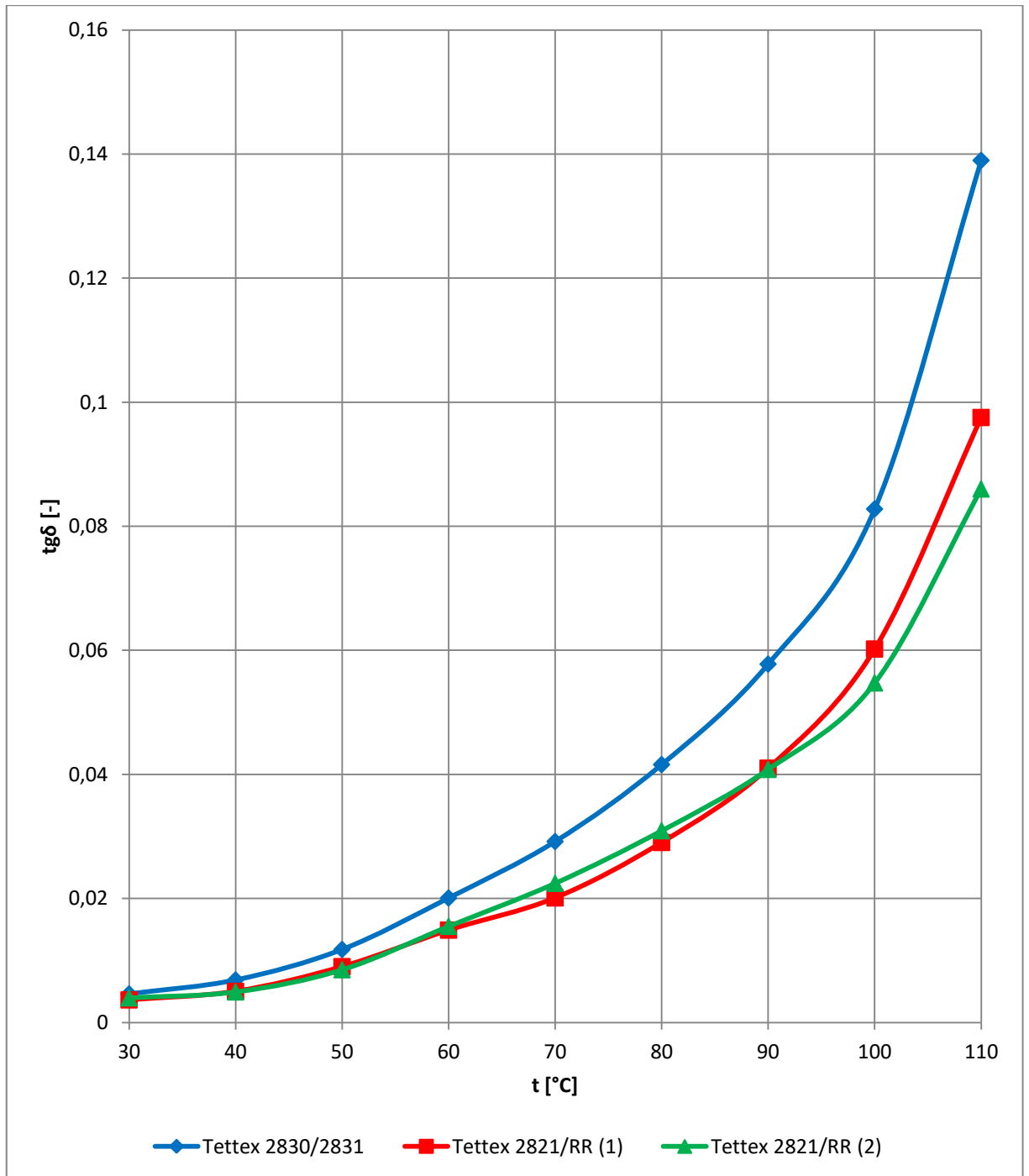
Obrázek 33: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 3).

• Vzorek č.: 4



Obrázek 34: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 4).

• Vzorek č.: 5



Obrázek 35: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 5).

4.3 Průměrné hodnoty

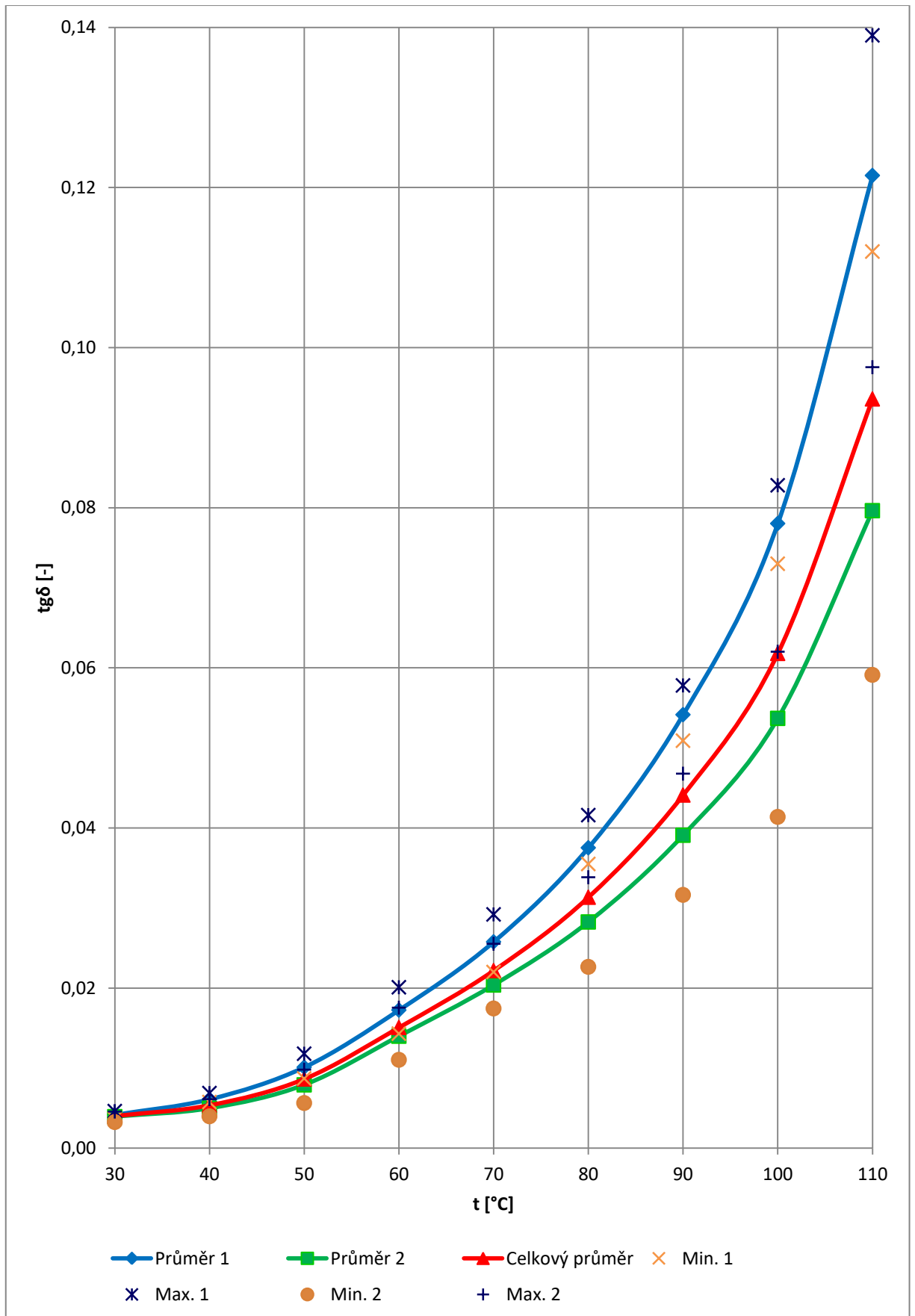
Výsledky jednotlivých měření byla zprůměrována dle jednotlivých metod měření, nalezena jejich maxima a minima pro každou teplotu. Ze všech dosažených hodnot byla získána průměrná závislost ztrátového činitele na teplotě pro měřené vzorky (syntetická pryskyřice Epoxylite® TSA 220). Graf této závislosti je na následující straně (obrázek 36).

- $tg\delta_{pr1}$ [-] Průměrná hodnota ztrátového činitele získaná dvojvektorovou metodou; v grafu znázorněno modrou barvou.
- $tg\delta_{max1}$ [-] Maximální hodnota ztrátového činitele získaná dvojvektorovou metodou; v grafu znázorněno tmavě modrou barvou.
- $tg\delta_{min1}$ [-] Minimální hodnota ztrátového činitele získaná dvojvektorovou metodou; v grafu znázorněno tmavě oranžovou barvou.
- $tg\delta_{pr2}$ [-] Průměrná hodnota ztrátového činitele získaná metodou čtyřkapacitního Scheringova můstku; v grafu znázorněno zelenou barvou.
- $tg\delta_{max2}$ [-] Maximální hodnota ztrátového činitele získaná metodou čtyřkapacitního Scheringova můstku; v grafu znázorněno tmavě modrou barvou.
- $tg\delta_{min2}$ [-] Minimální hodnota ztrátového činitele získaná metodou čtyřkapacitního Scheringova můstku; v grafu znázorněno tmavě oranžovou barvou.
- $tg\delta_{cel}$ [-] Průměrná hodnota ztrátového činitele obou metod; v grafu znázorněno červenou barvou.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty $tg\delta$, průměry, maxima a minima.

t_0 [°C]	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$tg\delta_{pr1}$ [-]	0,00417	0,00611	0,01011	0,01725	0,02578	0,03753	0,05415	0,07803	0,12150
$tg\delta_{max1}$ [-]	0,00463	0,00688	0,01180	0,02010	0,02920	0,04160	0,05780	0,08280	0,13900
$tg\delta_{min1}$ [-]	0,00368	0,00576	0,00870	0,01430	0,02200	0,03550	0,05090	0,07300	0,11200
$tg\delta_{pr2}$ [-]	0,00394	0,00498	0,00791	0,01399	0,02038	0,02825	0,03909	0,05369	0,07963
$tg\delta_{max2}$ [-]	0,00457	0,00612	0,00981	0,01755	0,02553	0,03384	0,04678	0,06201	0,09755
$tg\delta_{min2}$ [-]	0,00326	0,00398	0,00564	0,01104	0,01745	0,02265	0,03164	0,04138	0,05912
$tg\delta_{cel}$ [-]	0,00401	0,00536	0,00864	0,01508	0,02218	0,03134	0,04411	0,06180	0,09359

• Výsledný graf průměrných hodnot, maxim a minim jednotlivých měření



Obrázek 36: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (průměrné hodnoty, maxima a minima).

4.4 Vyhodnocení experimentu

Výsledek experimentu neodpovídá předpokladu, že dvěma měřicími metodami pro zjištění ztrátového činitele, by měly být dosaženy stejné výsledky u stejného vzorku. Jak je vidět ze všech grafů, tak do cca 60 °C se křivky závislosti $tg\delta$ na teplotě výrazně neliší. Největších rozdílů dosahují při maximální nastavené teplotě 110 °C. Je také vidět, že měření pomocí dvojvektorové metody vykazují vyšší nárůst ztrátového činitele. Všechny vzorky dosáhly při druhém měření pomocí čtyřkapacitního můstku lepší výsledky, než při předchozích dvou. Nejvíce jsou si podobné závislosti vzorku číslo 5 měřené přístrojem Tettex 2821/RR, v ostatních případech se liší.

Různé výsledky si lze vysvětlit obtížným nulováním čtyřkapacitního Scheringova můstku, a to z důvodu chyb P – regulátoru. Častokrát se stávalo, že při nulování došlo k zregulování teploty a ručička na nulovém indikátoru se vychýlila a muselo začít nové vyvažování můstku. Jen při měření vzorku číslo 5 nedocházelo k těmto problémům, a proto jsou si hodnoty nejvíce podobné.

Další možností, proč jsou výsledky odlišné, je, že při ohřívání materiálu docházelo k jeho postupnému vytvrzování a snížení ztrátového činitele. Tento princip je častý při výrobě velkých točivých strojů, kdy se elektroizolační systém vytvrdí až zvýšenou provozní teplotou.

Použitím stejného elektrodového systému pro obě metody byla snaha o eliminaci nepřímých chyb měření, které by mohly nastat v případě použití odlišných elektrodových systémů. Ruční nastavování konstantního napětí při měření vzorku pomocí čtyřkapacitního Scheringova můstku také nebylo přesné. Hodnota napětí se totiž měnila i v průběhu měření. Kolísala v rozmezí 496 V ÷ 507 V. Naopak při automatickém měření bylo možné nastavit přesné testovací napětí 500 V (499,9 V ÷ 500,1 V). Nelze však vyloučit ani chybu obsluhy jednotlivých přístrojů (př. špatné odečtení hodnot).

5 Závěr

Bakalářská práce je věnována popisu online diagnostických metod, příčinám dielektrických ztrát a měření ztrátového činitele. Nejprve byly popsány elektroizolační struktury z hlediska teplotních tříd a ke každé uvedeni příslušní zástupci. Pokud má vysokonapěťový elektroizolační systém splňovat řadu parametrů, tak je nejvýhodnější použít kompozitní materiál. V některých případech vn techniky se nepoužívají kompozity, př. PVC izolace kabelů. Ve vysokonapěťových transformátorech se nejčastěji vyskytuje elektroizolační systém olej – papír. Dnes je kladen větší důraz na ekologičnost EIS, proto jsou značné snahy nahradit minerální oleje syntetickými a rostlinnými. Dále byly v práci rozebrány děje způsobující dielektrické ztráty v materiálu. Tyto ztráty jsou měřeny jako ztrátový činitel.

Dle názvu práce byla její největší část věnována online diagnostickým metodám. Došlo k popsání současného stavu poznání v tomto oboru. Pro transformátory byl navrhnout online diagnostický systém měření ztrátového činitele. Tento systém by obsluze poskytoval aktuální informace o dějích ve vnitřní struktuře látky. Online měření ztrátového činitel však není jen hudbou budoucnosti. Ve výzkumných laboratořích v německém Řezně probíhá měření $tg\delta$ na kabelech. Zatím se však nepovedlo dostat do běžné praxe online měřicí systém pro určení ztrátového činitele. Budeme si muset vystačit s konvenčním offline měřením během výrobního procesu či na odpojeném stroji.

Poslední část práce se zabývala měřením ztrátového činitele při zvyšující se teplotě a konstantním napětí. Měření probíhalo na stejném druhu pevného izolačního materiálu (epoxidová pryskyřice – používaná v systému VPI). Vzorek byl měřen pomocí dvojvektorové metody a čtyřkapacitního Scheringova můstku. Přestože se jednalo o stejný materiál, tak výsledné hodnoty nebyly shodné. Důvody rozdílnosti jsou postupné vytvrzení materiálu, problém s regulátorem teploty nebo jiné vnější vlivy. Celý experiment je podrobně rozebrán ve stejnojmenné části práce.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tak v budoucím studiu bych chtěl spolupracovat s Katedrou technologií a měření na vývinu nových online diagnostických metod. Předkládanou bakalářskou práci je možno považovat za první seznámení se s elektrotechnickou diagnostikou a jejími principy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] ČSN EN 60085. *Elektrická izolace – Tepelné hodnocení a značení. ed. 2 (330250)*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2008. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=81628>.
- [4] *Insulation system*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Insulation_system.
- [5] *Kompozitní materiál*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kompozitn%C3%AD_materi%C3%A1l.
- [6] BARIŠ, Marián. *Studium elektrických vlastností kompozitů* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=35899. Bakalářská práce.
- [7] *Materiály pro hlavní izolaci izolačních systémů Resin-Rich*; In: Silent-Czech [online]. Bynina 204, 757 01 Valašské Meziříčí: -, 2017 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/c-materialy-pro-hlavni-izolaci-izolacnich-systemu-Resin-Rich/>.
- [8] *Resin-Rich: Izolační systém pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí točivých strojů třídy F (155 °C)*. In: VUKI trade [online]. -: -, 2017 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf.
- [9] *What Is Vacuum Pressure Impregnation?*. Na: Sloan Electromechanical Service & Sales [online]. San Diego: -, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.sloanelectric.com/vacuum-pressure-impregnation-services/>.
- [10] *What Is Vacuum Pressure Impregnation Process?*. In: *Nach Engineering Pvt. Ltd. Pune, India*. [online]. Pune Maharashtra: -, 2014 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://nachengg.net/vacuum-pressure-impregnation-process/>.
- [11] *Materiály pro hlavní izolaci izolačních systémů VPI*. In: Silent-Czech [online]. Bynina 204, 757 01 Valašské Meziříčí: -, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/d-materialy-pro-hlavni-izolaci-izolacnich-systemu-vpi/>.
- [12] *DuPont*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/DuPont>.
- [13] *Nomex® electrical insulation: Nomex® Paper, An Original Benchmark for Performance, Reliability*. Na: DuPont [online]. Wilmington: -, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/electrical-insulation/brands/nomex-electrical-insulation.html>.

- [14] *Specifikace materiálu – Nomex®*. In: Odetka: Made in Europe [online]. Vrbno pod Pradědem: -, 2016 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx.
- [15] *Nomex®*. Na: Coveme: The Value of Innovation [online]. San Lazzaro di Savena (BO): -, 2012 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.coveme.com/imageserver/gallery_big/files/immagini/prodotti-coveme/nuove-immagini/isolamento-elettrico/nomex/nomex02.jpg.
- [16] *Kapton® polyimide film: Extreme Versatility and Thermal Performance Provides Unlimited Potential*. In: DuPont [online]. Wilmington: -, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/membranes-films/polyimide-films/brands/kapton-polyimide-film.html>.
- [17] *Kapton*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kapton>.
- [18] *Elektroizolační oleje*. In: MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: -, 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroizolacni-oleje.html>.
- [19] TOTZAUER, Pavel. *Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/18914/Vlastnosti%20perspektivnich%20elektroizolacnich%20kapalin.pdf?sequence=1>. Diplomová práce.
- [20] *Základové oleje*. In: OLEJE CZ [online]. Brno: -, 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.oleje.cz/clanek/Zakladove-oleje>.
- [21] *MOGUL TRAF0 CZ-A*. In: PARAMO: MOGUL [online]. Pardubice: -, 2014 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_trafo_cza_z5.pdf.
- [22] *MOGUL TRAF0 N-A*. In: PARAMO: MOGUL [online]. Pardubice: -, 2014 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_mogul_trafo_na.pdf.
- [23] *Shell Diala S2 ZU-I*. In: LubriTEC: OLEJE A MAZIVA [online]. -: -, - [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.lubritec.cz/cs/elektroizolacni-oleje/248>.
- [24] *Shell Diala S3 ZX-I*. In: LubriTEC: OLEJE A MAZIVA [online]. -: -, - [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.lubritec.cz/cs/elektroizolacni-oleje/249>.
- [25] *MIDEL 7131: Synthetic Ester Transformer Fluid*. In: M&I MATERIALS [online]. Manchester: -, - [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://static.mimaterials.com/MIDEL/documents/sales/MIDEL%20Product%20Guide%20Low%20Res%20SN.pdf>.
- [26] *MIDEL Selection Guide: Choosing the right transformer liquid for your application*. In: M&I MATERIALS [online]. Manchester: -, - [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://static.mimaterials.com/MIDEL/documents/technical/MIDEL_selection_guide.pdf.
- [27] *Shell Fluid 4600*. In: MADOIL [online]. Břeclav: -, 2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.madoil.cz/dodavatelsky-program/shell/technicke-listy/Fluid4600.pdf>.
- [28] WACHTLOVÁ, Ilona. Primagra, a. s., *Ústní konzultace a pokyny pro výkup řepky olejně pro sklizeň 2016*, [2017-03-07].
- [29] MIDEL eN 1204. In: M&I MATERIALS [online]. Manchester: -, - [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://static.mimaterials.com/MIDEL/documents/technical/MIDEL_eN_1204_UK.pdf.

- [30] *Envirotemp™ FR3™: Fluid Improve reliability and transformer performance*. In: Cargill: Helping the world thrive [online]. Minneapolis: -, 2017 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.cargill.com/bioindustrial/envirotemp/fr3>.
- [31] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4. rozšířené vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-190-2.
- [32] KREJČÍ, Zbyšek. *Účinky pulzního namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39565. Diplomová práce.
- [33] PAJS, -. *Schéma polárního dielektrika v elektrickém poli*. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. San Francisco: -, 2014 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dielektrikum_polarni.svg.
- [34] PAJS, -. *Schéma nepolárního dielektrika v elektrickém poli*. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. San Francisco: -, 2014 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dielektrikum_nepolarni.svg.
- [35] VILHELM, Lukáš. *Elektrická pevnost plynného izolantu s izolační bariérou v elektromagnetickém poli* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10053/diplomova_prace_VILHELM_Lukas.pdf?sequence=1. Diplomová práce.
- [36] *32 Elektroizolační materiály a dielektrika* [online]. In: - [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/32%20%20Elektroizola%ED%20materie%20a%20dielektrika.doc>.
- [37] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [38] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-422-8.
- [39] PRSKAVEC, Ladislav. *Měření částečných výbojů* [online]. Praha, 1999 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: http://poli.feld.cvut.cz/~xprskave/pdf/SP_Mcv.pdf. Semestrální projekt.
- [40] ČSN EN 60076-2 ed. 2 – *Výkonové transformátory - Část 2: Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2011. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=89254>.
- [41] ČSN IEC 250 – *Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1998. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=50598>.
- [42] ČSN EN 60247 – *Izolační kapaliny – Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele (tan delta) a rezistivity při stejnosměrném napětí*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 2005. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=71962>.
- [43] *Scheringbrücke*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Scheringbr%C3%BCcke>
- [44] *LEMKE DIAGNOSTIC GMBH*. Uživatelská příručka: LDV - 5: Počítačový systém pro měření ztrátového činitele a kapacity. - Volkersdorf (SRN): -, 2003.
- [45] *Operating Instructions: 2830/2831, Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer, Version 2.0*. In: HAEFELY HIPOTRONICS [online]. Basel: -, 2016 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: https://update.haefely.com/ct2830/_private/MA_2830_2831_4843477_V2.0.pdf.

- [46] MITTAL, M. K., L. SRIDHAR, Manish TAMRAKAR, SHRIKISHAN, R. P. AGARWAL a S. S. RAJPUT. *Innovative system for precision measurement of high voltage capacitance & tan δ* . In: *International Journals of Multi-Dimensional Research* [online]. Haryana (India): -, 2014 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://ijmr.net.in/download.php?filename=PuXX12Wc51dGP3N.pdf&new=IJPA2462Feb5.pdf>.
- [47] ČSN IEC 167 – *Zkušební metody na stanovení izolačního odporu tuhých elektroizolačních materiálů*. Český normalizační institut: Český normalizační institut, 1993. Dostupné z: http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/34/28617/28617_nahled.htm
- [48] *EpoxyLite® TSA 220*. In: Wire Electric Supplies Limited [online]. Telford (United Kingdom): -, 2013 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.wes.uk.com/files/116.pdf>.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Dielektrika a izolanty.	12
Obrázek 2: Izolace provedená systémem resin-rich. Převzato z [8].	19
Obrázek 3: Pracovník firmy Sloan Electromechanical Service & Sales umísťuje přípravy do vakuové komory. Převzato z [9].	20
Obrázek 4: Izolace vinutí elektrického stroje pomocí Nomexu®. Převzato z [15].	21
Obrázek 5: Izolační pásky vyrobené z Kaptonu®. Převzato z [17].	21
Obrázek 6: Proces zpracování olejnin na olej. Převzato z [19].	24
Obrázek 7: Rozdíl mezi a) polární a b) nepolární strukturou látky. [33] [34]. – upraveno.	25
Obrázek 8: Působení pole na strukturu SiO ₂ při relaxační iontové polarizaci. Převzato z [36].	27
Obrázek 9: pole na strukturu polární látky při relaxační dipólové polarizaci. [36] – upraveno.	27
Obrázek 10: Rozložení prostorového náboje při působení elektrického pole. [36] – upraveno.	28
Obrázek 11: Germant-Philippovův model částečného výboje v dutince; a) pevné dielektrikum s vnitřní plynovou mezerou, b) zjednodušené náhradní schéma. Převzato z [37].	30
Obrázek 12: Průběh napětí zdroje a průběh napětí na dutince s výboji. Převzato z [37].	31
Obrázek 13: Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole. Převzato z [1].	33
Obrázek 14: Grafické znázornění posunu vektoru elektrické indukce za vektorem intenzity elektrického pole. Převzato z [1].	34
Obrázek 15: diagram pro reálné dielektrikum. [1] – upraveno.	35
Obrázek 16: Schéma sériového náhradního obvodu a fázorový diagram. Převzato z [1].	36
Obrázek 17: Schéma paralelního náhradního obvodu a fázorový diagram. Převzato z [1].	36
Obrázek 18: Blokové schéma monitorovacího systému. [37] – upraveno.	37
Obrázek 19: Návrh online měřicího systému ztrátového činitele.	40
Obrázek 20: Diagnostický systém s asynchronním motorem. [37] – upraveno.	43
Obrázek 21: Scheringův můstek. [1] – upraveno.	44
Obrázek 22: Schéma zapojení čtyřkapacitního Scheringova můstku. [1] – upraveno.	45
Obrázek 23: Schéma diskové elektrody s ochranným prstencem. [2] – upraveno.	46
Obrázek 24: Schéma zapojení automatické modifikace Scheringova můstku. [37] – upraveno.	47
Obrázek 25: Dvojvektorová měřící metoda. [45] – upraveno.	48
Obrázek 26: Schéma kapacitní sondy. [37] – upraveno.	49
Obrázek 27: měření izolačního odporu V-A metodou. [1] - upraveno.	53
Obrázek 28: Měřené vzorky.	54
Obrázek 29: Měření pomocí Tettex 2830/2831.	55
Obrázek 30: Vnitřní schéma přístrojů Tettex 2830/2831. Převzato z [45].	56
Obrázek 31: Měření pomocí Tettex 2821/RR.	57
Obrázek 32: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 1).	58
Obrázek 33: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 3).	59
Obrázek 34: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 4).	60
Obrázek 35: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (vzorek č.: 5).	61
Obrázek 36: Graf závislosti ztrátového činitele na teplotě (průměrné hodnoty, maxima a minima).	63

Přílohy

V příloze jsou uvedeny záznamové listy s výsledky jednotlivých měření.

- **Záznamový list – vzorek č. 1**

Materiál: TSA 220 + 1,25 % SiO₂
Napětí: 500 V (50 Hz)

Číslo vzorku: 1
Přítlačná síla: 3 N/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8
d [mm]	1,441	1,396	1,254	1,453	1,175	1,248	1,311	1,300
Ø _d [mm]	1,32225	Ø _d [cm]	0,13223					

Tettex 2830/2831

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₀ [pF]
1	30	30,7	0,00368	0,368	34,25	2,554	13,41034
2	40	40,4	0,00601	0,601	34,94	2,605	13,41267
3	50	50,4	0,00904	0,904	35,58	2,653	13,41123
4	60	60,2	0,0166	1,66	36,94	2,754	13,41322
5	70	69,5	0,0257	2,57	38,78	2,891	13,41404
6	80	79,5	0,0374	3,74	40,97	3,054	13,41519
7	90	90,2	0,056	5,6	44,86	3,344	13,41507
8	100	100,0	0,077	7,7	48,39	3,607	13,41558
9	110	109,8	0,112	11,2	52,77	3,935	13,41042

Tettex 2821/RR

d₁ [cm] 4,945 g [cm] 0,1 Ø_d [cm] 0,13223
 A [cm²] 19,98997 C₀ [pF] 13,38561

První měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	31,0	0,00352	0,352	39,69325	2,965367	2,51932
2	40	40,0	0,00398	0,398	40,15065	2,999538	2,49062
3	50	50,0	0,00564	0,564	41,10693	3,070979	2,43268
4	60	60,5	0,01104	1,104	42,34704	3,163624	2,36144
5	70	70,5	0,01825	1,825	43,73726	3,267484	2,28638
6	80	80,0	0,02891	2,891	45,18549	3,375676	2,2131
7	90	90,0	0,04292	4,292	47,1178	3,520034	2,12234
8	100	100,0	0,06185	6,185	48,36993	3,613577	2,0674
9	110	110,5	0,08934	8,934	51,9891	3,883955	1,92348

Druhé měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	31,0	0,00326	0,326	38,52466	2,878065	2,59574
2	40	40,0	0,00422	0,422	39,54945	2,954625	2,52848
3	50	50,0	0,00716	0,716	40,86036	3,052558	2,44736
4	60	60,0	0,01225	1,225	42,25685	3,156887	2,36648
5	70	70,0	0,01745	1,745	43,77287	3,270144	2,28452
6	80	80,0	0,02392	2,392	45,04586	3,365245	2,21996
7	90	90,0	0,03164	3,164	46,17701	3,44975	2,16558
8	100	100,0	0,04316	4,316	47,68308	3,562264	2,09718
9	110	110,0	0,06378	6,378	49,87979	3,726374	2,00482

- **Záznamový list – vzorek č. 3**

Materiál: TSA 220 + 1,25 % SiO₂

Číslo vzorku: 3

Napětí: 500 V (50 Hz)

Prítlačná síla: 3 N/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	
d [mm]	1,856	1,530	1,571	1,369	1,585	1,336	1,577	1,319	
Ø _d [mm]	1,51788	Ø _d [cm]	0,15179						

Tettex 2830/2831

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₀ [pF]
1	30	30,0	0,00387	0,387	40,99	3,508	11,68472
2	40	39,8	0,00576	0,576	41,7	3,569	11,68395
3	50	50,4	0,0109	1,09	42,62	3,618	11,77999
4	60	60,1	0,018	1,8	43,91	3,758	11,68441
5	70	69,9	0,0262	2,62	45,66	3,908	11,68373
6	80	80,4	0,0356	3,56	47,38	4,055	11,68434
7	90	89,8	0,0519	5,19	50,11	4,289	11,68338
8	100	100,1	0,073	7,3	52,95	4,532	11,68358
9	110	109,9	0,113	11,3	56,44	4,831	11,68288

Tettex 2821/RR

d₁ [cm] 4,945 g [cm] 0,1 Ø_d [cm] 0,15179

A [cm²] 19,98997 C₀ [pF] 11,66046

První měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	30,0	0,00446	0,446	46,53349	3,990707	2,14899
2	40	40,5	0,00554	0,554	47,22729	4,050207	2,11742
3	50	50,0	0,00932	0,932	48,03005	4,119052	2,08203
4	60	60,5	0,01533	1,533	49,08433	4,209467	2,03731
5	70	70,0	0,02098	2,098	49,84821	4,274978	2,00609
6	80	80,0	0,02888	2,888	51,10541	4,382795	1,95674
7	90	90,1	0,03915	3,915	52,26708	4,48242	1,91325
8	100	100,5	0,05583	5,583	54,30887	4,657523	1,84132
9	110	110,0	0,07611	7,611	56,54446	4,849247	1,76852

Druhé měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	31,0	0,00384	0,384	47,92715	4,110228	2,0865
2	40	40,0	0,00415	0,415	48,40974	4,151614	2,0657
3	50	50,0	0,00599	0,599	49,21066	4,220301	2,03208
4	60	60,5	0,01137	1,137	50,13838	4,299863	1,99448
5	70	70,5	0,01755	1,755	50,89887	4,365082	1,96468
6	80	80,0	0,02265	2,265	51,46548	4,413674	1,94305
7	90	90,0	0,03211	3,211	52,78215	4,526592	1,89458
8	100	100,0	0,04138	4,138	54,04441	4,634844	1,85033
9	110	110,0	0,05912	5,912	55,86904	4,791324	1,7899

- **Záznamový list – vzorek č. 4**

Materiál: TSA 220 + 1,25 % SiO₂

Číslo vzorku: 4

Napětí: 500 V (50 Hz)

Prítlačná síla: 3 N/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	
d [mm]	1,347	1,200	1,130	1,478	1,519	1,266	1,247	1,377	
Ø _d [mm]	1,32050	Ø _d [cm]	0,13205						

Tettex 2830/2831

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₀ [pF]
1	30	30,0	0,0045	0,45	43,66	3,251	13,42971
2	40	40,3	0,00578	0,578	44,96	3,328	13,50962
3	50	50,1	0,0087	0,87	45,36	3,377	13,43204
4	60	60,2	0,0143	1,43	46,2	3,44	13,43023
5	70	70,2	0,022	2,2	47,15	3,511	13,42922
6	80	80,0	0,0355	3,55	48,59	3,618	13,43007
7	90	90,2	0,0509	5,09	50,15	3,734	13,43064
8	100	100,2	0,0793	7,93	52,25	3,89	13,43188
9	110	110,3	0,122	12,2	54,59	4,065	13,42927

Tettex 2821/RR

d₁ [cm] 4,945 g [cm] 0,1 Ø_d [cm] 0,13205

A [cm²] 19,98997 C₀ [pF] 13,40335

První měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	30,0	0,00457	0,457	43,58666	3,251923	2,29428
2	40	40,0	0,00612	0,612	44,29718	3,304934	2,25748
3	50	50,0	0,00981	0,981	45,38132	3,385819	2,20355
4	60	60,5	0,01755	1,755	46,54302	3,472492	2,14855
5	70	70,5	0,02553	2,553	47,93289	3,576188	2,08625
6	80	80,5	0,03384	3,384	48,82312	3,642606	2,04821
7	90	90,5	0,04678	4,678	50,8911	3,796895	1,96498
8	100	100,0	0,06201	6,201	53,25381	3,973172	1,8778
9	110	110,5	0,09242	9,242	55,99731	4,17786	1,7858

Druhé měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	31,0	0,00418	0,418	46,14121	3,442513	2,16726
2	40	40,0	0,00585	0,585	46,54237	3,472443	2,14858
3	50	50,0	0,00778	0,778	47,22506	3,523377	2,11752
4	60	60,0	0,01392	1,392	48,16074	3,593187	2,07638
5	70	70,5	0,02073	2,073	49,09373	3,662796	2,03692
6	80	80,0	0,02784	2,784	50,0045	3,730747	1,99982
7	90	90,0	0,03827	3,827	51,19122	3,819286	1,95346
8	100	100,5	0,05027	5,027	52,7137	3,932875	1,89704
9	110	110,0	0,07268	7,268	54,92001	4,097484	1,82083

• **Záznamový list – vzorek č. 5**

Materiál: TSA 220 + 1,25 % SiO₂

Číslo vzorku: 5

Napětí: 500 V (50 Hz)

Prítlačná síla: 3 N/cm²

	1	2	3	4	5	6	7	8	
d [mm]	1,337	1,173	1,251	1,480	1,439	1,279	1,123	1,393	
Ø _d [mm]	1,30938	Ø _d [cm]	0,13094						

Tettex 2830/2831

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₀ [pF]
1	30	30,0	0,00463	0,463	46,78	3,454	13,54372
2	40	40,0	0,00688	0,688	47,51	3,508	13,54333
3	50	50,3	0,0118	1,18	48,46	3,578	13,54388
4	60	60,3	0,0201	2,01	49,78	3,675	13,54558
5	70	70,2	0,0292	2,92	51,03	3,768	13,54299
6	80	80,4	0,0416	4,16	52,44	3,872	13,54339
7	90	90,0	0,0578	5,78	54,29	4,008	13,54541
8	100	100,2	0,0828	8,28	56,73	4,189	13,54261
9	110	110,1	0,139	13,9	60,84	4,492	13,54408

Tettex 2821/RR

d₁ [cm] 4,945 g [cm] 0,1 Ø_d [cm] 0,13094

A [cm²] 19,98997 C₀ [pF] 13,51723

První měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	32,0	0,00367	0,367	37,9596	2,808238	2,63438
2	40	40,0	0,00505	0,505	38,87813	2,876191	2,57214
3	50	50,0	0,00903	0,903	40,19115	2,973327	2,48811
4	60	60,5	0,01492	1,492	41,8326	3,094762	2,39048
5	70	70,5	0,02011	2,011	43,39223	3,210142	2,30456
6	80	80,5	0,02905	2,905	45,37061	3,356502	2,20407
7	90	90,0	0,04102	4,102	47,52603	3,51596	2,10411
8	100	100,0	0,06023	6,023	50,60549	3,743777	1,97607
9	110	110,5	0,09755	9,755	53,99218	3,994323	1,85212

Druhé měření

	t ₀ [°C]	t [°C]	tgδ [-]	tgδ [%]	C _x [pF]	ε _r [-]	C ₄ [μF]
1	30	30,5	0,00399	0,399	42,75953	3,163335	2,33866
2	40	40,5	0,00495	0,495	43,26644	3,200837	2,31126
3	50	50,5	0,00853	0,853	44,04821	3,258671	2,27024
4	60	60,5	0,01552	1,552	45,33667	3,353991	2,20572
5	70	70,5	0,02246	2,246	46,89508	3,469282	2,13242
6	80	80,5	0,03093	3,093	48,24578	3,569206	2,07272
7	90	90,5	0,04082	4,082	49,72008	3,678274	2,01126
8	100	100,0	0,05476	5,476	50,96346	3,77026	1,96219
9	110	110,0	0,08603	8,603	53,25545	3,93982	1,877742