

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Aspekty aplikace fluidních systémů**

**PLZEŇ, 2017**

**Ing. Jiří Ulrych**

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu „Doktor“  
v oboru

Elektrotechnika

**Ing. Jiří Ulrych**

**Aspekty aplikace fluidních systémů**

*Školitel:* prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.

*Datum státní doktorské zkoušky:* 30. 10. 2015

*Datum odevzdání práce:* 16. 6. 2017

V Plzni, 2017

## **Prohlášení o duševním vlastnictví**

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě disertační práci na téma „Aspekty aplikace fluidních systémů“ zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni pod vedením prof. Ing. Václava Mentlíka, CSc.

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

V Plzni, 16. 6. 2017

.....

Jiří Ulrych

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád upřímně poděkoval svému školiteli prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za podporu, systematické vedení a cenné rady během zpracování disertační práce.

## **Aspekty aplikace fluidních systémů**

Předložená disertační práce je zaměřena na rozbor současného stavu modifikace fluidních systémů nanopřísadami, rozvedení aspektů interakce především kapalných dielektrik a elektrického pole, určení potřebného diagnostického systému, stanovení optimálního fluidního systému, výzkum a hodnocení rozhodujících elektrických parametrů vybraného fluidního systému a vytvoření a podání užitého vzoru.

Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina na bázi řepkového oleje s dispergovanou povrchově upravenou nanopřísadou  $\text{TiO}_2$ , která je výstupem tohoto výzkumu, je určena pro použití jako kapalná složka elektroizolačních systémů elektrických zařízení, provozovaných zejména v místech zvýšené ochrany životního prostředí. V případě úniků běžně používané elektroizolační kapaliny na bázi ropy z elektrického zařízení je velké nebezpečí kontaminace životního prostředí. Avšak díky snadné biologické odbouratelnosti nově vyvinuté elektroizolační kapaliny je vliv na životní prostředí velmi snížen až eliminován. Výzkumem objevená biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina s dispergovanými nanočásticemi se vyznačuje také tím, že finální elektrické vlastnosti získané elektroizolační kapaliny jsou na dobré úrovni.

Tato práce vznikla ve spolupráci s firmou ORGREZ, a.s. v rámci projektu TAČR TA03020251 s názvem Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí, jehož je autor disertační práce jedním z řešitelů, a byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2015-020 „Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice“.

141 stránky

64 obrázky

76 tabulky

1 přílohy

Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity (FEL ZČU)

v Plzni, 2017

## **Aspects of Fluid Systems Application**

The dissertation presented is focused on the analysis of the current state of fluid systems modifications with nanoparticles, expanding of the aspects of the interactions between the liquid dielectrics and the electric field, identification of the necessary diagnostic systems, determination of the optimal fluid system, research and evaluation of the decisive electrical parameters of the fluid system selected as well as the creation and application for the utility model.

The result of this research, the biodegradable on rapeseed oil based electro-insulating liquid with addition of dispersed surface treated TiO<sub>2</sub> nanoparticles, is intended for use as a liquid component of electrical insulation systems of electrical equipment, especially in places where increased environmental protection is required. In cases of leakage of commonly used electro-insulating fluids based on crude oil from electrical equipment, there is a great risk of the living environment contamination. However, due to the easy biodegradability of the newly developed electro-insulating liquid, the environmental impact is greatly reduced or completely eliminated. The biodegradable electro-insulating liquid with dispersed nanoparticles developed by the research is also characteristic by the present state high level of its final electrical properties.

This work was created in cooperation with the Company ORGREZ, a.s. within the TAČR TA03020251 Project named Environmental Friendly Insulating Liquids; the author of the dissertation thesis is one of the research workers and this work was supported by the grant of the Student Grant Agency of the University of West Bohemia No. SGS-2015-020 „Technology and Material Systems in Electrical Engineering“.

141 pages

64 figures

76 tables

1 appendices

The Faculty of Electrical Engineering of the University of West Bohemia (FEL ZČU)

in Pilsen, 2017

## **Aspekte der Fluidsystemeanwendung**

Die vorliegende Dissertation konzentriert sich auf die Analyse des aktuellen Zustands der durch Zugabe der Nanopartikel modifizierten Fluidsysteme, die Auflistung der Interaktionsaspekte der flüssigen Dielektrika mit dem elektrischen Feld, Bestimmung der notwendigen Diagnostiksysteme, Auswahl des optimalen Fluidsystems, Erforschung und Bewertung kritischer elektrischer Parameter des ausgewählten Fluidsystems sowie Gestaltung und Eintragung des Gebrauchsmusters.

Das Resultat dieser Forschung, die biologisch abbaubare elektrisch isolierende Flüssigkeit auf Basis von Rapsöl, mit Zugabe der darin dispergierten oberflächlich modifizierten TiO<sub>2</sub> Nanopartikel, soll als flüssige Komponente der elektrischen Isolierungssysteme von elektrischen Einrichtungen, insbesondere in Bereichen mit erhöhten Anforderungen an Umweltschutz, verwendet werden. Bei den üblicherweise verwendeten an der Basis von Erdöl hergestellten Elektroisierungsflüssigkeiten besteht ein hohes Risiko der Umweltkontamination im Falle eines Lecks. Dagegen, Dank der guten biologischen Abbaubarkeit der neu entwickelten elektrisch isolierenden Flüssigkeit ist der Einfluss auf die Umwelt stark reduziert oder sogar beseitigt. Die durch die Forschung neu entwickelte biologisch abbaubare Elektroisierungsflüssigkeit mit den dispergierten Nanopartikeln ist auch dadurch charakteristisch, dass ihre resultierenden elektrischen Eigenschaften einem sehr guten Niveau der gegenwärtigen Technik entsprechen.

Diese Arbeit ist in Zusammenarbeit mit der Firma ORGREZ, a.s. im Rahmen des Projektes TAČR TA03020251 unter dem Namen Umweltfreundliche Isolierflüssigkeiten entstanden; der Autor der Dissertation ist einer der beteiligten Forscher und die Arbeit wurde durch einen Zuschuss aus dem Grantsystem der Westböhmisches Universität Nr. SGS-2015-020 „Technologie und Materialsysteme in der Elektrotechnik“ unterstützt.

141 Seiten

64 Abbildungen

76 Tabellen

1 Anhang

Fakultät für Elektrotechnik der Westböhmisches Universität in Pilsen (FEL ZČU)

in Pilsen, 2017

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	<b>15</b>
<b>2 CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>19</b>
<b>3 ASPEKTY INTERAKCE DIELEKTRIK A ELEKTRICKÉHO POLE</b> .....	<b>21</b>
3.1 OBECNÉ ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ PRO ELEKTROTECHNICKÉ APLIKACE .....	21
3.2 VLASTNOSTI NOSIČŮ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE .....	21
3.3 DIELEKTRICKÝ PODSYSTÉM ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ A JEHO PRVKY.....	22
3.3.1 <i>Rozdělení dielektrik podle skupenství a struktury</i> .....	23
3.3.2 <i>Rozdělení dielektrik podle polárnosti</i> .....	23
3.4 POLARIZAČNÍ MECHANISMY DIELEKTRIK .....	29
3.4.1 <i>Deformační polarizace</i> .....	29
3.4.2 <i>Relaxační polarizace</i> .....	31
3.4.3 <i>Migrační polarizace</i> .....	32
3.5 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY.....	33
3.5.1 <i>Dielektrické ztráty kapalných dielektrik</i> .....	34
3.6 ELEKTRICKÁ VODIVOST DIELEKTRIK .....	35
3.6.1 <i>Hodnocení dielektrik z hlediska velikosti měrné elektrické vodivosti</i> .....	35
3.6.2 <i>Hodnocení dielektrik z hlediska typu volných nosičů elektrického náboje</i> .....	36
3.6.3 <i>Elektrická vodivost kapalných dielektrik</i> .....	37
3.7 DIELEKTRIKUM VE STEJNOSMĚRNÉM ELEKTRICKÉM POLI .....	37
3.7.1 <i>Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli</i> .....	39
3.8 DIELEKTRIKUM VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI .....	39
3.8.1 <i>Debye rovnice</i> .....	42
3.8.2 <i>Cole-Cole rovnice</i> .....	44
3.8.3 <i>Cole-Davidson rovnice</i> .....	45
3.8.4 <i>Havriliak-Negami rovnice</i> .....	46
<b>4 ZÁKLADNÍ FLUIDNÍ SYSTÉM</b> .....	<b>48</b>
<b>5 MODIFIKACE ZÁKLADNÍHO FLUIDNÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>51</b>
<b>6 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM</b> .....	<b>54</b>
6.1 PŘESKOKOVÉ NAPĚTÍ.....	54
6.1.1 <i>Přeskokové napětí kapalných dielektrik</i> .....	57
6.2 ANALYZÁTOR OLEJŮ A PEVNÝCH DIELEKTRIK .....	58



6.2.1	<i>Dielektrická absorpce</i> .....	60
	<i>Elektrický náboj během dielektrické absorpce</i> .....	61
	<i>Elektrický proud během dielektrické absorpce</i> .....	61
	<i>Polarizační index</i> .....	63
	<i>Rezistivita</i> .....	64
6.2.2	<i>Reálná složka komplexní permitivity a ztrátový činitel</i> .....	65
<b>7</b>	<b>VÝBĚR VHODNÉ NANOPŘÍŠADY A MNOŽSTVÍ</b> .....	<b>66</b>
7.1	POSTUP MĚŘENÍ .....	68
7.2	ZÍSKANÉ VÝSLEDKY A JEJICH VYHODNOCENÍ .....	68
<b>8</b>	<b>VÝZKUM ROZHODUJÍCÍCH ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ</b> .....	<b>72</b>
8.1	DIELEKTRICKÁ ABSORPCE .....	72
8.1.1	<i>Polarizační index</i> .....	72
	<i>Postup měření</i> .....	72
	<i>Získané výsledky a jejich vyhodnocení</i> .....	73
8.1.2	<i>Rezistivita</i> .....	75
	<i>Postup měření</i> .....	75
	<i>Získané výsledky a jejich vyhodnocení</i> .....	76
8.2	REÁLNÁ SLOŽKA KOMPLEXNÍ PERMITIVITY .....	78
	<i>Postup měření</i> .....	78
	<i>Získané výsledky a jejich vyhodnocení</i> .....	79
8.3	ZTRÁTOVÝ ČINITEL .....	80
	<i>Postup měření</i> .....	80
	<i>Získané výsledky a jejich vyhodnocení</i> .....	80
<b>9</b>	<b>OPTIMÁLNÍ FLUIDNÍ SYSTÉM</b> .....	<b>83</b>
9.1	OBLAST TECHNIKY .....	83
9.2	DOSAVADNÍ STAV TECHNIKY .....	83
9.3	PODSTATA TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ .....	84
9.4	PŘÍKLAD PROVEDENÍ .....	85
9.5	PRŮMYSLOVÁ VYUŽITELNOST .....	86
9.6	NÁROKY NA OCHRANU .....	87
<b>10</b>	<b>PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDNÍ OBOR A VÝSTUPY PRO PRAXI</b> .....	<b>87</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>89</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>90</b>
	<b>SEZNAM ODBORNÝCH PUBLIKACÍ AUTORA</b> .....	<b>96</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>99</b>

## Seznam symbolů a zkratek

ČSN EN .....	Chráněné označení českých technických norem
$\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	Oxid hlinitý
$\text{TiO}_2$ .....	Oxid titaničitý
$\varepsilon' (-)$ .....	Reálná složka komplexní permitivity
$\text{tg } \delta (-)$ .....	Ztrátový činitel
(ppm) .....	Parts per million (z angličtiny, česky „dílů či částic na jeden milion“)
$\text{SiO}_2$ .....	Oxid křemičitý
$\text{ZnO}$ .....	Oxid zinečnatý
ISO .....	Mezinárodní organizace pro normalizaci
IEC .....	Mezinárodní elektrotechnická komise
KOH .....	Hydroxid draselný
ASTM .....	Americká společnost pro zkoušení a materiály
OECD .....	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
OPPTS .....	Úřad pro znečišťování, prevenci a toxické látky
US EPA .....	Agentura pro ochranu životního prostředí
$\delta^- (C)$ .....	Záporný parciální náboj
$\delta^+ (C)$ .....	Kladný parciální náboj
$\beta$ -relaxace .....	Typ dipólové relaxační polarizace
$\gamma$ -relaxace .....	Typ dipólové relaxační polarizace
$\beta^*$ -relaxace .....	Typ dipólové relaxační polarizace
$\delta (^\circ)$ .....	Ztrátový úhel
$\sigma (\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$ .....	Měrná vnitřní elektrická vodivost
$\sigma_p (\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$ .....	Měrná povrchová elektrická vodivost
$\rho (\Omega\cdot\text{m})$ .....	Měrný vnitřní elektrický odpor
$R_i (\Omega)$ .....	Izolační elektrický odpor
$S (\text{m}^2)$ .....	Plocha měřicích elektrod
$d (\text{m})$ .....	Vzdálenost měřicích elektrod
$U, U_z (\text{V})$ .....	Stejnoseměrné elektrické napětí
$I (\text{A})$ .....	Ustálený stejnosměrný elektrický proud
$M (\text{C}\cdot\text{m})$ .....	Makroskopický dipólový moment
$V (\text{m}^3)$ .....	Objem

$P$ ( $C \cdot m^{-2}$ )	.....	Celková polarizace
$E$ ( $V \cdot m^{-1}$ )	.....	Intenzita stejnosměrného elektrického pole
$\epsilon_0$ ( $F \cdot m^{-1}$ )	.....	Permitivita vakua
$\chi$ (-)	.....	Dielektrická susceptibilita
$D$ ( $C \cdot m^{-2}$ )	.....	Elektrická indukce stejnosměrného elektrického pole
$\epsilon$ ( $F \cdot m^{-1}$ )	.....	Permitivita
$\epsilon_r$ ( $F \cdot m^{-1}$ )	.....	Relativní permitivita
$C_0$ (F)	.....	Kapacita vakuového kondenzátoru
$Q_0$ (C)	.....	Nabíjecí elektrický náboj na elektrodách vakuového kondenzátoru
$C_x$ (F)	.....	Kapacita reálného kondenzátoru
$Q_x$ (C)	.....	Nabíjecí elektrický náboj na elektrodách reálného kondenzátoru
$P_{zss}$ (W)	.....	Stejnoseměrný ztrátový výkon
$E^*$ ( $V \cdot m^{-1}$ )	.....	Komplexní intenzita elektrického pole
$E_m$ ( $V \cdot m^{-1}$ )	.....	Maximální hodnota komplexní intenzity elektrického pole
$D^*$ ( $C \cdot m^{-2}$ )	.....	Komplexní elektrická indukce
$D_m$ ( $C \cdot m^{-2}$ )	.....	Maximální hodnota komplexní elektrické indukce
$t$ (s), $t$ ( $^{\circ}C$ )	.....	Čas nebo teplota
$\omega$ ( $rad \cdot s^{-1}$ )	.....	Úhlová frekvence vnějšího elektrického pole
$f$ (Hz)	.....	Frekvence vnějšího elektrického pole
$\epsilon^*$ (-)	.....	Komplexní permitivita
$\chi^*$ (-)	.....	Komplexní dielektrická susceptibilita
$\epsilon''$ (-)	.....	Imaginární složka komplexní permitivity
$\epsilon_d'$ (-)	.....	Polarizační reálná složka komplexní permitivity
$\epsilon_i'$ (-)	.....	Vodivostní reálná složka komplexní permitivity
$\epsilon_d''$ (-)	.....	Polarizační imaginární složka komplexní permitivity
$\epsilon_i''$ (-)	.....	Vodivostní imaginární složka komplexní permitivity
$U^*$ (V)	.....	Komplexní elektrické napětí
$I^*$ (A)	.....	Komplexní elektrický proud
$\tau$ (s)	.....	Relaxační doba, časová konstanta
$\epsilon_s$ (-)	.....	Počáteční hodnota reálné složky komplexní permitivity
$\epsilon_{\infty}$ (-)	.....	Konečná hodnota reálné složky komplexní permitivity

$\alpha$ .....	Distribuční parametr
$\tau_0$ (s) .....	Nejpravděpodobnější relaxační doba
$y(\tau)$ .....	Distribuční funkce
$\beta$ .....	Tvarový parametr Cole-Davidson diagramu
$\alpha, \beta$ .....	Tvarové parametry Havriliak-Negami diagramu
$\sigma_{dc}$ (S·m <sup>-1</sup> ) .....	Stejnoseměrná konduktivita
N .....	Exponent charakterizující tvar vodivostní křivky
$\sigma^*$ (S·m <sup>-1</sup> ) .....	Komplexní konduktivita
$\sigma'$ (S·m <sup>-1</sup> ) .....	Reálná složka komplexní konduktivity
$\sigma''$ (S·m <sup>-1</sup> ) .....	Imaginární složka komplexní konduktivity
A .....	Konstanta vyjadřující schopnost látky se polarizovat
s .....	Exponent charakterizující stupeň interakce mezi ionty a mřížkami
DBDS .....	Dibenzylsulfid
DBPC .....	Fenolický antioxidant
(C <sub>X</sub> ) .....	Elektrodový systém s měřeným vzorkem
(T) .....	Vysokonapěťový transformátor
(C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> ) .....	Kondenzátorový napěťový dělič
(R) .....	Odpor pro omezení proudu při přeskočení
$E_p$ (kV·mm <sup>-1</sup> ) ....	Elektrická pevnost
$U_p$ (kV) .....	Průrazné napětí
(DC) .....	Stejnoseměrný vysokonapěťový zdroj
$R_{iZ}$ (Ω) .....	Vnitřní odpor zdroje
$R_0$ (Ω) .....	Odpor přívodů mezi zdrojem a kondenzátorem (C <sub>X</sub> )
$R_Z$ (Ω) .....	Zátěž
(R <sub>RX</sub> ) .....	Ztráty elektrodového systému s měřeným vzorkem
$I_{CX}$ (A) .....	Proud protékající elektrodovým systémem
$I_{RX}$ (A) .....	Proud protékající ztrátovým odporem
$R_{RX}$ (Ω) .....	Ztrátový odpor
$Q_d$ (C) .....	Nabíjecí elektrický náboj odpovídající deformačním polarizacím
$Q_f$ (C) .....	Nabíjecí elektrický náboj odpovídající relaxačním polarizacím
$Q_{rv}$ (C) .....	Vybíjecí elektrický náboj odpovídající relaxačním polarizacím
$Q_{0v}$ (C) .....	Vybíjecí elektrický náboj na elektrodách vakuového kondenzátoru

$Q_{dv}$ (C) .....	Vybíjecí elektrický náboj odpovídající deformačním polarizacím
$i_0$ (A) .....	Nabíjecí proud odpovídající nabíjení geometrické kapacity kondenzátoru
$I_{0max}$ (A) .....	Maximální nabíjecí proud
$i_a$ (A) .....	Absorpční proud
$i_{v(\infty)}$ (A) .....	Ustálená hodnota vodivostního proudu
$i_d$ (A) .....	Dobíjecí proud
$i_v$ (A) .....	Vodivostní proud
$i_r$ (A) .....	Resorpční proud
$i_k$ (A) .....	Vybíjecí proud
$I_{kmax}$ (A) .....	Maximální vybíjecí proud
$p_i$ (-) .....	Polarizační index
$p_{i10}$ (-) .....	Desetiminutový polarizační index
$p_{i1}$ (-) .....	Minutový polarizační index
$R_{i(15)}$ ( $\Omega$ ) .....	Izolační elektrický odpor v patnácté vteřině
$R_{i(60)}$ ( $\Omega$ ) .....	Izolační elektrický odpor v šedesáté vteřině
$i_{a(15)}$ (A) .....	Absorpční proud v patnácté vteřině
$i_{a(60)}$ (A) .....	Absorpční proud v šedesáté vteřině
$i_{a(\infty)}$ (A) .....	Ustálená hodnota absorpčního proudu
$K$ (m) .....	Konstanta elektrodového systému Tettex 2903
$C_{vzd}$ (pF) .....	Kapacita vzduchu platíci pro elektrodový systém Tettex 2903
$I_N$ (A) .....	Referenční proud
( $C_N$ ) .....	Referenční kondenzátor
(AC) .....	Vysokonapěťový střídavý zdroj
$I_X$ (A) .....	Součet proudů $I_{RX}$ a $I_{CX}$
$R_X$ ( $\Omega$ ) .....	Nastavitelný bočník 1
$R_N$ ( $\Omega$ ) .....	Nastavitelný bočník 2
(ADC) .....	Analogovo/digitální převodník
(DPS) .....	Digital Signal Processing
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	Oxid hlinitý (gama)
UV .....	Ultrafialové záření

## Úvod

Elektrické zařízení je systém, který se skládá z pěti základních podsystémů (konstrukční, magnetický, elektrický, dielektrický, termoventilační). Všechny tyto podsystémy jsou nezbytné pro správnou funkci elektrického zařízení. Nejcitlivější podsystém elektrického zařízení je podsystém dielektrický. Pro sledování stavu dielektrického podsystému existuje celá řada diagnostických metod.

Kapalná dielektrika jsou nedílnou součástí izolačních systémů těchto elektrických zařízení, která pro svoji funkci využívají dvousubstančních izolací sestávajících z pevné a kapalné složky. Jedná se zejména o transformátory, kde je toto uspořádání izolačního systému velmi preferováno, neboť dovolí velmi vysoký výkon stroje. To je pochopitelně velmi výhodné a tím konstruktéry strojů vyhledávané. V převážné většině se dnes jako zmíněné kapalné složky izolačních systémů těchto strojů používá minerálních olejů – produktů vzniklých destilací ropy. Tyto elektroizolační kapaliny mají velmi dobré vlastnosti zvláště elektrické, jsou však závislé na dovozu výchozí suroviny a jejich některé vlastnosti jsou problematické. Kromě zvýšené hořlavosti je u těchto kapalin zvláště závažná jejich neshnilivost se životním prostředím. Ta je způsobena jejich schopností kontaminovat okolní prostředí při jejich náhodném, byť nechtěném, úniku do zemního substrátu. Tato skutečnost je závažná zejména v oblastech zvýšené ochrany prostředí, jako jsou okolí vodních zdrojů, chráněná území, intravilány obcí a podobné oblasti.

Je tedy logické, že je snahou techniků, jimž není problematika životního prostředí zcela lhostejná, hledání nových cest a materiálů vhodných pro řešení tohoto problému. Dobrou alternativou se zde jeví aplikace přírodních esterů jako elektroizolačních kapalin. Přírodní estery však nelze přímo použít jako elektroizolační kapaliny, musí projít náležitými technologickými operacemi, které je zbaví nežádoucích příměsí tak, aby se staly dobrými fluidními systémy pro elektrické aplikace. Problémem je i silná vlastnost těchto látek vázat vodu, což má negativní vliv na jejich elektrický odpor, dielektrické ztráty a zejména pak na hladinu přeskokového napětí – tedy velikosti elektrického gradientu, který jsou schopné bezpečně podržet.

Jedním ze současných žhavých témat je aplikace nanočástic v systémech elektrických zařízení s cílem zlepšení jejich vlastností. Nanočástice lze také aplikovat v oblasti kapalných dielektrik – aplikovaných fluidních systémech. Výzkumem bylo dosaženo získání řepkového oleje inhibovaného fenolickým inhibitorem a obsahujícího modifikované nanočástice oxidu titaničitého v množství zlomků procenta. Výsledky získané soustavnou

prací, činností zahrnující přípravu systému a další nutné práce, dospěly k určení optimálního procentuálního plnění tímto oxidem tak, že finální elektrické vlastnosti získané elektroizolační kapaliny jsou na dobré úrovni. Tento fluidní systém se stal náplní užitého vzoru 30 268 s názvem Elektroizolační biologicky odbouratelná kapalina.

## 1 Současný stav problematiky

V současné době používané elektroizolační kapaliny pro elektrická zařízení s kombinovaným izolačním systémem sestávajícím z pevného a kapalného izolantu používají jako svou kapalnou složku převážně minerální oleje vyráběné rafinací surové ropy a dalšími technologickými postupy. Používání těchto elektroizolačních kapalin je určeno normami ČSN EN 60296 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité minerální izolační oleje pro transformátory a vypínače“ a ČSN EN 604229 „Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních – Návod pro kontrolu a údržbu“.

Výše uvedené minerální oleje mají dobré elektroizolační vlastnosti a navíc mají dobře zpracované regenerační technologie umožňující prodloužení jejich životnosti. Jejich velkou nevýhodou je ovšem jejich radikální nesnášenlivost s životním prostředím způsobená velmi špatnou biologickou odbouratelností. To má za následek jejich problematické použití zejména v ekologicky citlivých oblastech a v místech se zpřísněným režimem ochrany životního prostředí (chráněná území, blízkost zdrojů pitné vody apod.). V případech nekontrolovatelných úniků minerálních olejů z elektrických zařízení, nebo dokonce jejich havárií dochází k silně negativním dopadům na životní prostředí ve formě ekologických havárií. V současné době se světoví autoři věnují elektrickým vlastnostem minerálních olejů s dispergovanými nanopřísadami [1, 2, 3]. Ve světové literatuře, která se zabývá fluidními systémy s dispergovanými nanopřísadami, jsou dále k nalezení témata zabývající se tepelnou vodivostí, viskozitou nebo prouděním fluidních systémů.

Autoři Das S. K., Choi S. U., Yu W., Pradeep T. v knize Nanofluids: Science and Technology [4] se zabývali syntézou, přenosem tepla vedením, teoretickým modelováním tepelné vodivosti, prouděním, vařením, aplikacemi, budoucími směry a přípravou fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Xuan Y., Li Q. v článku Heat transfer enhancement of nanofluids [5] se zabývali tepelnou vodivostí fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Putra N., Roetzel W., Das S. K. v článku Natural convection of nano-fluids [6] se zabývali přirozeným prouděním ve fluidních systémech s nanopřísadami. Autoři Barber J., Brutin D, Tadrist L. v článku A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids [7] se

zabývali přenosem tepla ve fluidních systémech s nanopřísadami. Autoři Mali S., Pise A., Acharya A. v článku Review on flow boiling heat transfer enhancement with nanofluids [8] se zabývali přenosem tepla ve fluidních systémech s nanopřísadami. Autoři Ahn H. S., Kim M. H., Acharya A. v článku A Review on Critical Heat Flux Enhancement With Nanofluids and Surface Modification [9] se zabývali zvýšením tepelného toku fluidních systémů s nanopřísadami a povrchovou modifikací nanopřísad. Autoři Oueslati F. S., Bennacer R. v článku Heterogeneous nanofluids: natural convection heat transfer enhancement [10] se zabývali zvyšováním přirozeného tepelného proudění fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Philip J., Shima P. D. v článku Thermal properties of nanofluids [11] se zabývali tepelnými vlastnostmi fluidních systémů s nanopřísadami. Autor Xue Q. Z. v článku Model for effective thermal conductivity of nanofluids [12] se zabýval modelem pro efektivní tepelnou vodivost fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Wang L., Wei X. v článku Nanofluids: Synthesis, Heat Conduction, and Extension [13] se zabývali syntézou a tepelnou vodivostí fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M. R., Goodarzi M., Dahari M., Mahian O., Dalkılıç A. S., Wongwises S. v článku Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies [14] se zabývali viskozitou fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Mahbubul I. M., Saidur R., Amalina M. A. v článku Latest developments on the viscosity of nanofluids [15] se zabývali viskozitou fluidních systémů s nanopřísadami. Autoři Mishra P. Ch., Mukherjee S., Nayak S. K., Panda A. v článku A brief review on viscosity of nanofluids [16] se zabývali viskozitou fluidních systémů s nanopřísadami.

Autoři Mergos J. A., Athanassopoulou M. D., Argyropoulos T. G., Dervos C. T. v článku Dielectric Properties of Nanopowder Dispersions in Paraffin Oil [2] se zabývali reálnou složkou komplexní permitivity a ztrátovým činitelem minerálního oleje s určitým obsahem nanopřísad. Výroba fluidního systému s nanopřísadami byla provedena pomocí ultrazvukových vibrací (od 30 min. do 45 min.) V tab. 1.1 [2] je přehledně zobrazena charakteristika použitých nanopřísad a výsledek. Jedná se o závislosti reálné složky komplexní permitivity a ztrátového činitele na frekvenci a teplotě. Z výsledků studie je možné učinit tento závěr: Použité nanopřísady zvyšují hodnotu reálné složky komplexní permitivity a ztrátového činitele olejů.



Tab. 1.1 Shrnutí studie zabývající se reálnou složkou komplexní permitivity a ztrátovým činitelem oleje s určitým obsahem nanopřísad

typ nanopřísad	množství nanopřísad	velikost nanopřísad	výsledek
a) povrchově neupravené 1-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> b) povrchově neupravené TiO <sub>2</sub> c) povrchově neupravené 2-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> d) povrchově neupravená směs 1-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a TiO <sub>2</sub>	1,25 (%) 2,5 (%) 5 (%) pouze d) až do 2,5 (%) každé z nich	a) maximální velikost 50 (nm) b) maximální velikost 100 (nm) c) od 63 (μm) do 200 (μm)	<p>porovnání <math>\epsilon'</math> (-) olejů s různým obsahem nanopřísad od nejnižší hodnoty po nejvyšší pro frekvenci 1000 (Hz) při pokojové teplotě:</p> <p>1) graf 3 [2]: olej s 2,5 (%) 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, čistý olej, čistý olej po ultrazvukovém ošetření, olej s 1,25 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dehydrovaný olej s 2,5 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, olej s 2,5 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2) graf 5 [2]: čistý olej, olej s 1,25 (%) TiO<sub>2</sub>, olej s 2,5 (%) TiO<sub>2</sub>, olej s 1,25 (%) TiO<sub>2</sub> a 1,25 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, olej s 2,5 (%) TiO<sub>2</sub> a 2,5 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, olej s 5 (%) TiO<sub>2</sub>, olej s určitým obsahem kapiček H<sub>2</sub>O a s 1,25 (%) TiO<sub>2</sub> a 1,25 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></p> <p>porovnání tg <math>\delta</math> (-) olejů s různým obsahem nanopřísad od nejnižší hodnoty po nejvyšší pro frekvenci 1000 (Hz) při pokojové teplotě:</p> <p>1) graf 4 [2]: čistý olej, čistý olej po ultrazvukovém ošetření, olej s 2,5 (%) 2-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, olej s 1,25 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dehydrovaný olej s 2,5 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, olej s 2,5 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2) graf 6 [2]: čistý olej, olej s 5 (%) TiO<sub>2</sub>, olej s 2,5 (%) TiO<sub>2</sub> a 2,5 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, olej s 1,25 (%) TiO<sub>2</sub>, olej s 2,5 (%) TiO<sub>2</sub>, olej s určitým obsahem kapiček H<sub>2</sub>O a s 1,25 (%) TiO<sub>2</sub> a 1,25 (%) 1-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></p>

Autoři Jin H., Andritsch T., Tsekmes I. A., Kochetov R., Morshuis P. H. F., Smit J. J. v článku Properties of Mineral Oil based Silica Nanofluids [1] došli k těmto závěrům: Nanopřísadou SiO<sub>2</sub> o obsahu 0,01 (%) se zvýší přeskokové napětí (kV)/2,5 (mm) oproti oleji bez nanopřísady o 10 (kV) z 51 (kV) na 61 (kV); obsah vlhkosti 25 (ppm). Nanopřísadou SiO<sub>2</sub> o obsahu 0,02 (%) se zvýší přeskokové napětí oproti oleji bez nanopřísady o 14 (kV) z 51 (kV) na 65 (kV); obsah vlhkosti 25 (ppm). Nanopřísadou SiO<sub>2</sub> o obsahu 0,01 (%) se zvýší přeskokové napětí oproti oleji bez nanopřísady o 9 (kV) z 76 (kV) na 85 (kV); obsah vlhkosti 15 (ppm). Nanopřísadou SiO<sub>2</sub> o obsahu 0,02 (%) se zvýší

přeskokové napětí oproti oleji bez nanopřířady o 13 (kV) z 76 (kV) na 89 (kV); obsah vlhkosti 15 (ppm). Povrchově upravenou nanopřířadou SiO<sub>2</sub> o obsahu 0,01 (%) se sníží přeskokové napětí oproti oleji bez nanopřířady o 19 (kV) z 51 (kV) na 32 (kV); obsah vlhkosti 25 (ppm). Přeskokové napětí se sníží o 29 (kV) z 61 (kV) na 32 (kV) u oleje s obsahem 0,01 (%) povrchově upravené nanopřířady SiO<sub>2</sub> oproti oleji s obsahem 0,01 (%) nanopřířady SiO<sub>2</sub>; obsah vlhkosti 25 (ppm). Pro měření byl použit minerální olej Diala S3ZXIG. Výroba fluidního systému s nanopřířadami byla provedena pomocí magnetického míchání (15 min.) s následnými ultrazvukovými vibracemi (2 hod.). Průměrná velikost nanopřířad byla 15 (nm). Výsledky článku [65] ukazují, že určité množství nanopřířady SiO<sub>2</sub> bez povrchové úpravy je schopné zvýšit přeskokové napětí minerálního oleje. Nanopřířada SiO<sub>2</sub> s hydrofobní povrchovou úpravou, které se používá k zabránění aglomerace nanopřířad, však přeskokové napětí oleje snižuje. Autoři Fuxin W., Ming D., Jianzhuo D., Ming R., Rixin Y. v článku Study of Breakdown Mechanism of Transformer Oil Based on ZnO Nanoparticles [3] došli k těmto závěrům: S rostoucí velikostí nanopřířad ZnO klesá hodnota přeskokového napětí minerálního oleje. Pro velikost nanopřířad 20 (nm) bylo naměřeno přeskokové napětí přibližně 41,5 (kV), pro velikost 50 (nm) přeskokové napětí přibližně 39,5 (kV), pro velikost 80 (nm) přeskokové napětí přibližně 38 (kV), pro velikost 120 (nm) přeskokové napětí přibližně 36,5 (kV). Dále bylo zjištěno, že s rostoucím hmotnostním podílem nanopřířad ZnO v minerálním oleji přeskokové napětí roste. Pro hmotnostní podíl 0,005 (%) bylo naměřeno přeskokové napětí přibližně 37 (kV), pro hmotnostní podíl 0,01 (%) přeskokové napětí přibližně 41,5 (kV), pro hmotnostní podíl 0,02 (%) přeskokové napětí přibližně 45,5 (kV), pro hmotnostní podíl 0,05 (%) přeskokové napětí přibližně 48,5 (kV). Pro měření byl použit minerální olej Karamay 25#. Výroba fluidního systému s nanopřířadami byla provedena pomocí ultrazvukových vibrací.

Wu G., Zhao Y., Liu P., Peng Q. v článku Dielectric Frequency Response of Oil-paper Composite Insulation Modified by Nanoparticles [17] se zabývali frekvenční odezvou dielektrických vlastností olej-papírové izolace modifikovanou nanopřířadou TiO<sub>2</sub> a bylo zjištěno že: přidáním nanopřířady se objevily nové nízkofrekvenční relaxační jevy. Nanopřířada zlepšila elektrickou pevnost oleje a také nanopřířadou obohacený olej vykazoval mnohem menší závislost elektrického přeskočů na množství vlhkosti. Nanopřířada by tedy mohla být přímo odpovědná za zmírnění škodlivého účinku vlhkosti na elektrický přeskoč. V porovnání s čistou olej-papírovou izolací bylo zjištěno, že reálná a imaginární část komplexní permitivity nanopřířadou modifikované olej-papírové izolace se

zvýšila. Avšak přidaná nanopřířada je prospěšná v redukci dielektrických ztrát transformátoru, který pracuje při průmyslové frekvenci. S růstem vlhkosti se dielektrické ztráty čisté olej-papírové a nanopřířadou modifikované olej-papírové izolace zvyšují. Nanopřířadou modifikovaná olej-papírová izolace má také nižší ztrátový činitel od teploty 10 (°C) až do teploty 50 (°C) v porovnání s čistou olej-papírovou izolací. Avšak vyšší teplota, přibližně od 50 (°C), má negativní dopad na velikost ztrátového činitele nanopřířadou modifikované olej-papírové izolace. Pro měření byl použit minerální olej Kelamayi DB-#25. Výroba fluidního systému s nanopřířadami byla provedena pomocí solvothermal a ultrazvukových vibrací. Hmotnostní podíl nanočástic v oleji byl 0,06 (%) a průměrná velikost nanočástic byla 25 (nm). Vzorky lepenky použité pro měření byly kruhové s tloušťkou 1 (mm) a průměrem 55 (mm).

Jak již bylo zmíněno výše, v současné době se světoví autoři věnují elektrickým vlastnostem pouze minerálních olejů, které mají ve svém objemu dispergované nanopřířady. Tyto studie dokázaly, že dispergované nanopřířady jsou schopné elektrické vlastnosti fluidních systémů zlepšit. Vzhledem k tomu, že minerální oleje jsou nešetrné k životnímu prostředí, je nutné hledat lepší řešení. Další vývoj v oblasti elektroizolačních kapalin s dispergovanými nanopřířadami se proto může ubírat cestou zařazení přírodních esterů. V tom spočívá původnost předkládaného řešení.

## 2 Cíle práce

V současné době se světoví autoři věnují elektrickým vlastnostem minerálních olejů, které mají ve svém objemu dispergované nanopřířady. Studie ukázaly, že dispergované nanopřířady jsou schopné elektrické vlastnosti fluidních systémů určitým způsobem zlepšit. Minerální oleje však mohou být nešetrné k životnímu prostředí. Především z tohoto důvodu je nutné hledat lepší řešení. Další výzkum v oblasti elektroizolačních kapalin s dispergovanými nanopřířadami se proto může ubírat cestou zařazení přírodních esterů. Elektroizolační kapaliny na bázi přírodních esterů, které jsou biologicky odbouratelné, je možné použít jako základ pro výrobu elektroizolačního fluidního systému s dispergovanými nanopřířadami. Norma ČSN EN 62770 doporučuje, aby elektroizolační kapaliny na bázi rostlinných olejů sloužily jako náplň především hermetizovaných, tj. atmosféricky uzavřených, elektrických zařízení (např. transformátorů). Původní myšlenka spočívá v tom, že cílem této práce je zjištění možností modifikace elektrických vlastností inhibovaného řepkového oleje vhodnými nanopřířadami se zřetelem k praktické aplikaci

získaného fluidního systému jako elektroizolační kapaliny. Dále je potřebné zdůraznit, že použité nanopříspědy musí být k životnímu prostředí zcela inertní. V tab. 2.1 je uvedeno shrnutí přípustných mezních hodnot důležitých vlastností biologicky odbouratelných rostlinných olejů požadovaných pro použití v elektroizolační technice podle požadavků normy ČSN EN 62770.

*Tab. 2.1 Shrnutí přípustných mezních hodnot důležitých vlastností biologicky odbouratelných rostlinných olejů požadovaných pro použití v elektroizolační technice podle požadavků normy ČSN EN 62770*

vlastnost	zkušební metoda	mezní hodnoty
<b>fyzikální</b>		
vzhled	-	čisté, bez kalů a nežádoucí suspenze
viskozita při 100 (°C)	ISO 3104	max. 15 (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
viskozita při 40 (°C)	ISO 3104	max. 50 (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
bod tuhnutí	ISO 3016	max. -10 (°C)
obsah vody	IEC 60814	max. 200 (mg·kg <sup>-1</sup> )
hustota při 20 (°C)	ISO 3675 nebo ISO 12185	max. 1 (g·ml <sup>-1</sup> )
<b>elektrické</b>		
přeskokové napětí	IEC 60156 mez. 2,5 (mm)	max. 35 (kV)
ztrátový činitel při 90 (°C)	IEC 60247	max. 0,05 (-)
<b>chemické</b>		
číslo kyselosti	IEC 62021-3	max. 0,06 (mg KOH·goleje <sup>-1</sup> )
korozní síra	IEC 62535 nebo ASTM D1275B IEC 62697-1	žádná síra
veškerá aditiva	IEC 60666 nebo další vhodné metody	max. hmotnostní podíl 5 (%)
<b>zkoušky po testu oxidační stability podle normy IEC 61125: 1992</b>		
celková kyselost	kapitola 1.9.4 z IEC 61125:1992	max. 0,6 (mg KOH·goleje <sup>-1</sup> )
viskozita při 40 (°C)	ISO 3104	max. 30 (%)
ztrátový činitel při 90 (°C)	IEC 60247	max. 0,5 (-)
<b>zdraví, bezpečnost a životní prostředí</b>		
teplota hoření	ISO 2592	min. 300 (°C)
teplota vznícení	ISO 2719	min. 250 (°C)
biodegradace	OECD 301B, C nebo F OPPTS 835.311 (US EPA)	rychle biologicky odbouratelný

Díličí cíle disertační práce jsou:

- Rozbor současného stavu modifikace fluidních systémů nanopřísadami
- Rozvedení aspektů interakce především kapalných dielektrik a elektrického pole
- Určení potřebného diagnostického systému
- Stanovení optimálního fluidního systému
- Výzkum a hodnocení rozhodujících elektrických parametrů vybraného fluidního systému
- Vytvoření a podání užitečného vzoru

### **3 Aspekty interakce dielektrik a elektrického pole**

Tato kapitola se zabývá chováním především kapalných dielektrik po jejich vložení do elektrického pole. Teoretická znalost této problematiky je velmi důležitá především při interpretaci naměřených výsledků. Každá látka je složitý systém, který je dán množinou všech jeho systémových prvků, např. atomů, a vazbami mezi těmito prvky. Materiál je látka, která se vyrábí za konkrétním účelem a má určité požadované modifikované vlastnosti. Atomy se skládají z atomového jádra a atomového obalu. Atomové jádro se skládá z protonů a neutronů. Tyto částice se dohromady nazývají nukleony. Atomový obal se skládá z elektronů. Neutrální atom má stejný počet protonů a elektronů. Molekula je systém, který se skládá minimálně ze dvou atomů. [18-21]

#### **3.1 Obecné rozdělení materiálů pro elektrotechnické aplikace**

Rozdělení materiálů pro elektrotechnické aplikace je možné udělat třemi způsoby. První způsob představuje rozdělení podle struktury, druhý způsob je rozdělení podle skupenství a třetí způsob znamená rozdělení podle vlastností nosičů elektrického náboje. Skupenství udává, zda se jedná o materiál v pevném, kapalném nebo plynném stavu, struktura podává informace o vnitřních vazbách, vlastnosti nosičů elektrického náboje určují rozdíly mezi volnými a vázanými nosiči elektrického náboje. [18, 19, 22]

#### **3.2 Vlastnosti nosičů elektrického náboje**

Nosiče elektrického náboje jsou částice, které nesou určitý elektrický náboj. V přírodě existují dva druhy elektrického náboje – kladný a záporný. Souhlasné elektrické náboje se odpuzují, nesouhlasné přitahují. Nosiče elektrického náboje se rozdělují na volné a vázané. [22, 23]

**Volné nosiče** elektrického náboje se mohou ve struktuře materiálu pohybovat mnohem lépe než nosiče vázané. Materiály s vysokou koncentrací volných nosičů elektrického náboje se vyznačují vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí a nazývají se vodiče. Izolanty jsou materiály s malou koncentrací volných nosičů elektrického náboje. Volnými nosiči elektrického náboje bývají většinou ionty nebo elektrony a pohybují-li se působením vnějšího elektrického pole v určitém směru, teče elektrický proud. Volné ionty vznikají při ionizaci nebo disociaci molekul nečistot nebo molekul vlastní látky. Na toku elektrického proudu se mohou podílet kladné i záporné ionty. Volné elektrony vznikají tak, že se uvolní nějaké valenční elektrony z atomového obalu nebo v případě silného vnějšího elektrického pole mohou do materiálu vniknout z přiloženého elektrodového systému. Nejvíce volných elektronů mají kovy. [19, 22-25]

**Vázané nosiče** mají, na rozdíl od volných nosičů, ve struktuře materiálu svoje pevné místo a jsou mnohem méně pohyblivé. Nemohou se tedy volně pohybovat, mohou se jen potočit nebo posunout. Jedná se hlavně o molekuly, jejichž vazby určí, jak se budou ve vnějším elektrickém poli chovat. [22, 23]

### 3.3 Dielektrický podsystém elektrických zařízení a jeho prvky

Každé elektrické zařízení lze považovat za sériový spolehlivostní řetězec, který se skládá z pěti základních podsystémů, konstrukčního, magnetického, elektrického, dielektrického a termoventilačního. Všechny tyto podsystémy jsou nezbytné pro jeho správnou funkci. Z hlediska provozu zařízení je nutné především věnovat pozornost nejcitlivějšímu prvku spolehlivostního řetězce – dielektrickému podsystému. [18, 22, 25]

Sleduje-li se chování prvků dielektrického obvodu, je důležité definovat rozdíly mezi izolantem a dielektrikem. Izolant je pasivní prvek bránící průchodu proudu mezi místy s odlišným elektrickým potenciálem. K požadovaným elektrickým vlastnostem izolantu patří vysoká elektrická pevnost, vysoký izolační elektrický odpor, malá schopnost polarizace a co možná nejnížší dielektrické ztráty. Hlavními parametry izolantu jsou izolační elektrický odpor a elektrická pevnost. Izolant v ideálním případě neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje, obsahuje pouze vázané nosiče elektrického náboje a izolační elektrický odpor je nekonečně veliký. Reálný izolant však kromě vázaných nosičů elektrického náboje obsahuje i určité množství volných nosičů elektrického náboje. Přítomnost volných nosičů elektrického náboje v izolantu má za následek jeho částečnou elektrickou vodivost a podílí se na určitých jevech, které mohou vést až k elektrickému průrazu izolantu. [18, 22, 23]

Dielektrikum je aktivní prvek, který si po vložení do vnějšího elektrického pole vytvoří pole vlastní. Tento jev se nazývá polarizací dielektrika. Požadované elektrické vlastnosti dielektrik jsou především vyhovující schopnost polarizace a co nejnižší dielektrické ztráty. Pojem dielektrikum a izolant spolu úzce souvisí, protože izolanty jsou podmnožinou dielektrik. Každý izolant je dielektrikum, ne každé dielektrikum izolantem. Dielektrika se rozdělují podle skupenství, struktury a polárnosti. [18, 22, 23]

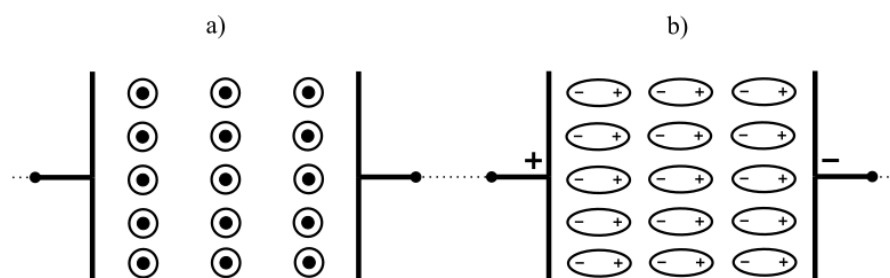
### 3.3.1 Rozdělení dielektrik podle skupenství a struktury

Skupenství je velmi důležité z hlediska určení všech fyzikálních vlastností dielektrika. Vlastnosti dielektrika lze studovat z makroskopického nebo mikroskopického hlediska. Makroskopická úroveň nahlíží na dielektrikum jako na objekt přesně daných rozměrů, který se skládá z velkého množství atomů a molekul. Polarizace je v tomto případě chápána jako vznik dipólového momentu dielektrika jako celku. Mikroskopická úroveň zkoumá vlastnosti jednotlivých dílčích atomů a molekul řešeného dielektrika, např. geometrii, vibrace, tvar, hybnost, schopnost disociovat. Polarizace je v tomto případě viděna jako vznik jednotlivých dipólových momentů zkoumaných atomů a molekul. Skupenství dielektrika může být plynné, kapalné nebo pevné. Pouze pevná dielektrika se ještě dále dělí podle struktury na dielektrika amorfnní a krystalická. Krystalická dielektrika mají střed souměrnosti a amorfnní dielektrika střed souměrnosti nemají. Krystalická dielektrika se rozdělují na dielektrika monokrystalická a polykrystalická. [19, 20, 22, 26]

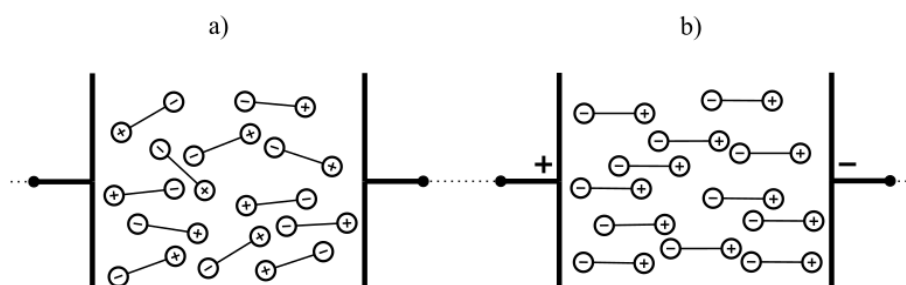
### 3.3.2 Rozdělení dielektrik podle polárnosti

Plynná, kapalná a pevná dielektrika se člení na dielektrika nepolární a polární. Polární a nepolární dielektrikum se navzájem liší stavbou hmoty a tudíž i chováním ve vnějším elektrickém poli. Toto rozdělení dielektrik je účelné a používané a je učiněno podle toho, zda v dielektriku existují určité elementární dipóly, např. molekuly různě směřované, i bez připojení vnějšího elektrického pole (polární dielektrikum) nebo neexistují (nepolární dielektrikum). Princip nepolárního dielektrika je zobrazen na obr. 3.3.1 a polárního na obr. 3.3.2. Polárnost či nepolárnost dielektrika závisí na charakteru a složitosti částic, ze kterých je toto dielektrikum složeno (atomy, molekuly). Výsledný dipólový moment víceatomové molekuly je dán vektorovým součtem dipólových momentů jejích jednotlivých částí. Neuspořádaný tepelný pohyb atomů a molekul (resp. dipólů) působí proti vlivu vnějšího elektrického pole. [20-23, 27]

U nepolárního dielektrika se proces polarizace odehrává uvnitř jeho částic. Bez působení vnějšího elektrického pole mají jádro i elektronový obal shodné těžiště ve středu jádra. V případě přiložení vnějšího elektrického pole dojde k nepatrnému posunu jádra a elektronového obalu ve směru přiloženého vnějšího elektrického pole a vznikne tak indukovaný elementární dipól. Nepolární dipóly jsou např. molekuly vodíku ( $H_2$ ), chlórů ( $Cl_2$ ), dusíku ( $N_2$ ), kyslíku ( $O_2$ ) nebo atomy xenonu a argonu. Polární dielektrikum obsahuje ve svém objemu permanentní elementární dipóly. Existence těchto permanentních elementárních dipólů je dána vnitřní strukturou. Dipóly polárních dielektrik mohou být molekuly náhodně orientované do různých směrů. V případě přiložení vnějšího elektrického pole začne na tyto dipóly působit točivý moment a dipóly se otočí o určitý úhel do směru působení vnějšího elektrického pole. Polarizace proběhne za určitou dobu, u různých typů dielektrik bývá tato doba velice rozdílná. Polární dipóly jsou např. molekuly vody ( $H_2O$ ), amoniaku ( $NH_3$ ) nebo chloridu sodného ( $NaCl$ ). [20-23, 27, 28]



Obr. 3.3.1 Nepolární dielektrikum a) bez vlivu vnějšího elektrického pole, b) pod vlivem vnějšího elektrického pole [23, 28]



Obr. 3.3.2 Polární dielektrikum a) bez vlivu vnějšího elektrického pole, b) pod vlivem vnějšího elektrického pole [23, 28]

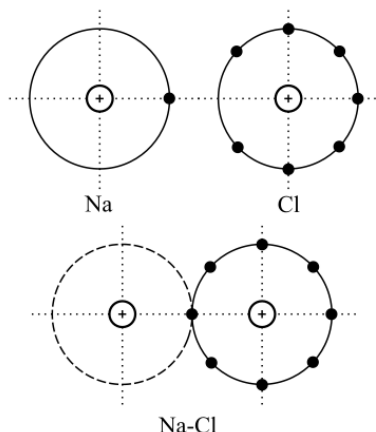
Molekula je složena z atomů a typ vazeb mezi jednotlivými atomy určí, zda se jedná o molekulu polární nebo nepolární. Existuje molekula prvku a molekula sloučeniny. Molekula prvku se skládá z atomů jednoho druhu a molekula sloučeniny se skládá z různých druhů atomů. Atomy se snaží být v co nejstabilnější formě, a proto vznik molekuly vede vždy k zvýšení stability daného systému. Rozhodujícím faktorem vzniku vazby mezi atomy je počet valenčních elektronů. Obecně platí, že se navzájem atomy slučují tak, aby



získaly strukturu valenčního pásu inertního plynu. Tyto inertní plyny mají ve valenční vrstvě osm elektronů. Atomy jsou tedy nejstabilnější právě tehdy, když mají ve valenční vrstvě osm elektronů. Vazby se dělí na primární a sekundární. Primární vazby působí přímo mezi atomy a rozdělují se na iontovou a kovalentní. Mezi primární vazby se řadí ještě vazba kovová. Sekundární vazby jsou mezimolekulové nebo meziiontové. Mezimolekulové vazby se člení na vazbu vodíkovou a van der Waalsovu. [18-20, 27]

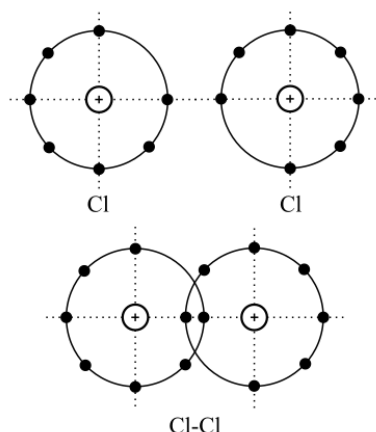
**Iontová vazba** obecně vzniká tak, že reagující atom odevzdá svůj valenční elektron jinému atomu. Tímto způsobem se atomy změní na ionty a molekulu pak tvoří ionty opačných znamének, které se navzájem přitahují. Silové působení mezi ionty má elektrostatický charakter. Kationty označují kladně nabitě ionty, které ztratily elektron. Anionty jsou záporně nabitě ionty, které přijaly elektron. Iontová vazba vzniká mezi elektro pozitivními a elektronegativními prvky a síla vazby je dána rozdílem elektronegativit těchto prvků. Iontová vazba ze dvou atomů vždy vytvoří polární molekulu, ale molekula, která je tvořena z více než dvou atomů v iontové vazbě, polární být může i nemusí. Polárnost této víceatomové molekuly závisí na vzájemné orientaci jejich jednotlivých iontových vazeb. Typickým příkladem silné iontové polární vazby je vazba Na-Cl a její vznik je zachycen na obr. 3.3.3. Na kladný iont (kationt) se změní atom sodíku (elektropozitivní prvek), protože svůj valenční elektron předá atomu chloru (elektronegativní prvek), z kterého se stává záporný iont (aniont). [18, 19, 22, 27, 29]

Ionty  $\text{Na}^+$  a  $\text{Cl}^-$  tvoří molekulu, která je spojena dohromady pomocí iontové vazby. Tyto molekuly pak ve větším množství vytvoří krystalovou mřížku, která drží pohromadě pomocí meziiontových vazebných sil. **Meziiontové vazby** se vyskytují u elektroneutralních molekul s iontovým charakterem atomových vazeb a nelze je nasytit např. jako vazby iontové nebo kovalentní. Silové působení meziiontových vazeb má elektrostatický charakter. Při vytvoření krystalu chloridu sodného je každý iont sodíku ( $\text{Na}^+$ ) obklopen šesti ionty chlóru ( $\text{Cl}^-$ ) a každý iont chlóru ( $\text{Cl}^-$ ) obklopen šesti ionty sodíku ( $\text{Na}^+$ ). Toto uspořádání se periodicky opakuje. [21, 27, 29, 30]



Obr. 3.3.3 Vznik iontové vazby mezi atomy Na a Cl (Na obrázku jsou zobrazeny pouze valenční elektronové pásy a zjednodušená jádra atomů.) [20]

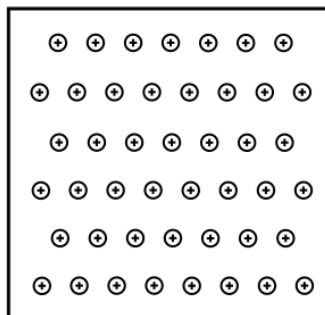
**Kovalentní vazba** vzniká mezi atomy, které mají vysokou hodnotu elektronegativity. Elektronegativita musí být u těchto reagujících atomů stejná nebo jen málo rozdílná. Silové působení kovalentní vazby má elektrostatický charakter. Při kovalentní vazbě se orbity valenčních elektronů navzájem překrývají a vazba je o to silnější, čím je překrytí valenčních elektronů větší. Dva atomy v kovalentní vazbě, které mají dokonale symetrické uspořádání elektronových obalů, vytvoří nepolární molekulu. Jestliže je však symetrie elektronových obalů porušena, těžiště záporného a kladného elektrického náboje již nesplývá a atomy vytvoří molekulu polární. Jak bylo uvedeno výše, výsledný dipólový směr molekuly je dán vektorovým součtem všech dílčích dipólů v molekule. Příkladem symetrické kovalentní nepolární vazby může být dvouatomová molekula chloru, jejíž vznik znázorňuje obr. 3.3.4. [18-20, 22]



Obr. 3.3.4 Vznik kovalentní vazby mezi dvěma atomy Cl (Na obrázku jsou zobrazeny pouze valenční elektronové pásy a zjednodušená jádra atomů.) [19]

**Kovová vazba** se podstatně liší od ostatních primárních vazeb a vyskytuje se v kovech. Vzniká u atomů, které mají malé obsazení valenčního orbitu a nemůže tak vzniknout

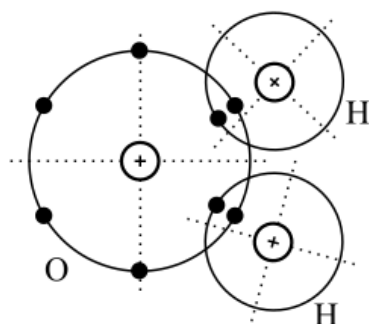
iontová ani kovalentní vazba. Silové působení v těchto vazbách má elektrostatický charakter. Atomy kovu odevzdají do okolí valenční elektrony a stanou se kladnými ionty. Tyto elektrony nepatří k žádnému kladnému iontu a tvoří tzv. elektronový plyn. Celá struktura drží pohromadě právě díky existenci tohoto elektronového plynu, který způsobuje také vysokou tepelnou a elektrickou vodivost kovů. Kovy musí obsahovat stejný počet volných elektronů a kladných iontů. Mřížka kovových kladných iontů rozmístěných v elektronovém plynu je zachycena na obr. 3.3.5. [18, 19, 24, 29]



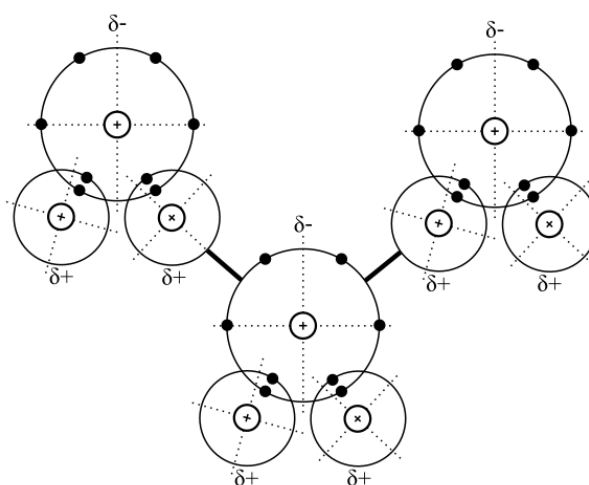
Obr. 3.3.5 Mřížka kovových kladných iontů rozmístěných v elektronovém plynu [29]

K mezimolekulovým vazbám patří vazba van der Waalsova a vazba vodíková. Tyto mají mnohem menší vazebné síly než vazby primární. Studium velikosti a charakteru mezimolekulových sil je velice aktuální na makroskopické i mikroskopické úrovni. [18, 26, 29]

**Vodíková vazba** neboli vodíkový můstek je slabá vazebná interakce mezi molekulami obsahujícími vodík (elektropozitivní prvek), který je kovalentně vázán na nějaký silně elektronegativní prvek. Vodíková vazba se někdy může uplatnit i v rámci dvou částí jedné molekuly. Je podstatně slabší než vazba primární, ale silnější než např. vazba van der Waalsova. Vznik vodíkové vazby je způsoben tím, že atom vodíku má pouze jeden elektron a při vytvoření kovalentní vazby s výrazně elektronegativním prvkem dojde ke značnému odhalení kladně nabitého protonu. Prvky, např. kyslík, dusík, fluor, jsou schopné v dostatečné míře odčerpávat elektronovou hustotu od jádra vodíku. Parciální kladný náboj atomu vodíku jedné molekuly je pak přitahován k negativní části molekuly jiné. Silové působení v těchto vazbách má elektrostatický charakter. Na molekulách vody je ukázán příklad vodíkové vazby. Molekula vody (obr. 3.3.6) se skládá ze dvou atomů vodíku, které jsou kovalentně vázány na kyslík. Vodíkové vazby mezi molekulami vody, včetně kladných a záporných parciálních nábojů, jsou zobrazeny na obr. 3.3.7. [18, 20, 29, 31]

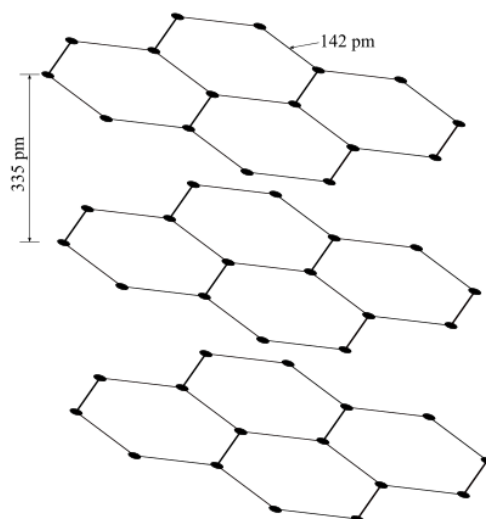


Obr. 3.3.6 Molekula vody (Na obrázku jsou zobrazeny pouze valenční elektronové pásy a zjednodušená jádra atomů.) [18]



Obr. 3.3.7 Vodíkové vazby mezi molekulami vody (Na obrázku jsou zobrazeny pouze valenční elektronové pásy a zjednodušená jádra atomů.) [31]

**Van der Waalsova vazba** se vyskytuje mezi atomy inertního plynu nebo mezi molekulami, které již nemohou vytvořit spojení jiné a jsou mezi sebou vázány kovalentními vazbami. Van der Waalsova vazba se tedy uplatňuje u elektroneutrálních částic. Princip van der Waalsovy vazby je zde vysvětlen na silovém působení mezi dvěma atomy inertního plynu. Přitažlivé síly, které působí mezi jádrem prvního atomu a valenčními elektrony druhého atomu, jsou silnější než odpudivé síly, které působí mezi elektrony ve valenční slupce prvního a druhého atomu. Silové působení v těchto vazbách má elektrostatický charakter. [18, 19, 27, 29] U grafitu (obr. 3.3.8) jsou atomy uhlíku vázány kovalentními vazbami do pravidelných šestiúhelníků. Jednotlivé vrstvy pravidelných šestiúhelníků jsou pak spojeny dohromady slabou van der Waalsovou vazbou, což má za následek lehké otírání grafitu. [20, 30]



Obr. 3.3.8 Van der Waalsovy vazby v grafitu [30]

### 3.4 Polarizační mechanismy dielektrik

Dělení polarizačních mechanismů: a) K polarizaci dochází při působení vnějšího elektrického pole, b) bez působení vnějšího elektrického pole (piezoelektrická, spontánní, pyroelektrická polarizace). Mechanismy polarizací, které byly vyvolány bez použití vnějšího elektrického pole, v této práci probírány nejsou. [22, 24]

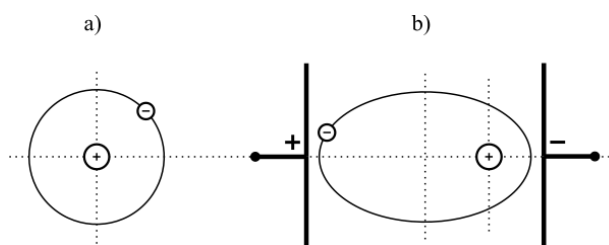
Vlivem přiloženého vnějšího elektrického pole jsou nosiče elektrického náboje dielektrika přitahovány k opačně nabitým elektrodám a dochází k natočení nebo pohybu těchto elektrických nábojů. Může se jednat o vázané nosiče elektrického náboje (obecně dipóly) nebo o volné nosiče elektrického náboje (elektrony, ionty, koloidní částice). Nosičům elektrického náboje brání k natočení či pohybu buď vazebné síly mezi nimi, jejich vlastní tepelný pohyb ovlivněný teplotou okolního prostředí nebo frekvence vnějšího elektrického pole. Existují tři základní skupiny polarizačních mechanismů: skupina deformačních polarizací, skupina relaxačních polarizací a skupina migračních polarizací. Základní rozdíl mezi nimi je v tom, že deformační polarizace jsou téměř bezztrátové, zatímco relaxační polarizace a migrační polarizace ztrátové jsou. [24, 32-34]

Celková dielektrická odezva měřeného dielektrika je dána superpozicí jednotlivých polarizačních mechanismů a vodivostní složky [35]. Polarizační mechanismy se projevují ve stejnosměrném i střídavém elektrickém poli.

#### 3.4.1 Deformační polarizace

Deformační polarizace se rozděluje na elektronovou a iontovou polarizaci. **Elektronová polarizace** probíhá ve všech skupenstvích a všech látkách. Vlivem působení

vnějšího elektrického pole dojde k posunutí atomových jader ve směru působení tohoto vnějšího elektrického pole a elektrony se posunou v opačném směru. V důsledku velkých vazebných sil mezi jádrem a elektronem je toto posunutí poměrně malé a nepřesahuje rozměry atomu. Na obr. 3.4.1 je vidět atom vodíku: a) bez vlivu vnějšího elektrického pole, b) pod vlivem vnějšího elektrického pole. Atom vodíku byl zvolen jako názorný příklad elektronové polarizace, protože se skládá pouze z jednoho protonu a jednoho elektronu. Z makroskopického hlediska se atom jeví jako elementární dipól, který je orientován ve směru působení vnějšího elektrického pole. Dipól je v tomto typu polarizace chápán jako určité vychýlení kladného a záporného náboje v rámci jednoho atomu. Elementární dipól má svůj indukovaný dipólový moment, jehož velikost závisí na schopnosti atomu se polarizovat a také na velikosti vnitřního lokálního pole. [22, 32-34, 36, 37]

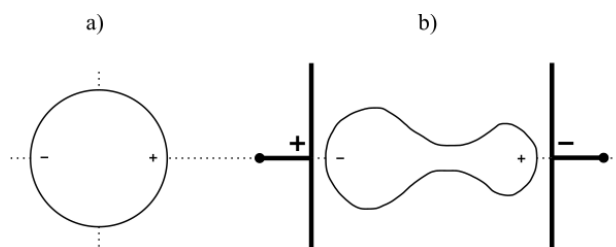


Obr. 3.4.1 Atom vodíku a) bez vlivu vnějšího elektrického pole, b) pod vlivem vnějšího elektrického pole [22, 38]

Doba ustálení atomu do nové rovnovážné polohy je u elektronové polarizace velmi rychlá ( $10^{-16}$  až  $10^{-13}$  sekundy), a proto je tato polarizace nezávislá na frekvenci vnějšího elektrického pole. Elektronová polarizace není ani ovlivněna tepelným pohybem atomů, protože probíhá pouze uvnitř těchto atomů (teplotní nezávislost). Z výše uvedeného vyplývá, že se jedná o polarizaci, kde nedochází k téměř žádné ztrátě energie. [22, 32-34, 36, 37]

**Iontová polarizace** se projevuje tam, kde jsou přítomny dipóly, které mají iontový charakter. Dipólem se v tomto typu polarizace rozumí určité vychýlení kladného a záporného náboje v rámci molekuly s iontovými vazbami. Tyto dipóly jsou základním stavebním prvkem iontových krystalů. Elektronové rozdělení ve jmenovaných dipólech není jednotlivými atomy tvořící molekulu symetricky sdíleno, což vede k přítomnosti iontů s opačným nábojem. Největší rozdíl mezi iontovou a elektronovou polarizací představuje to, že u iontové polarizace existují dipóly i bez přiložení vnějšího elektrického pole. Přiložené vnější elektrické pole způsobí vychýlení dipólů z jejich původních poloh do směru tohoto elektrického pole a vytvoří se tak nový indukovaný dipólový moment. Tento indukovaný dipólový moment je nositelem iontové polarizace. Doba ustálení se u iontové

polarizace pohybuje v rozmezí  $10^{-13}$  až  $10^{-12}$  sekundy. Doba ustálení je tedy o něco větší než u elektronové polarizace. Iontová polarizace je téměř frekvenčně a teplotně nezávislá a bezetrátová, jako polarizace elektronová. Na obr. 3.4.2 je zobrazen dipól s iontovým charakterem vazby, který se nachází: a) bez vlivu, b) pod vlivem působení vnějšího elektrického pole. [22, 32-34, 36]



Obr. 3.4.2 Dipól s iontovým charakterem vazby a) bez vlivu vnějšího elektrického pole, b) pod vlivem vnějšího elektrického pole [38]

### 3.4.2 Relaxační polarizace

Relaxační polarizace se dělí na dipólovou relaxační a iontovou relaxační polarizaci. Elektronová a vlastně i iontová polarizace vyplývají z dipólů, které indukovalo přiložené vnější elektrické pole. V dielektriku existují také tzv. dipóly permanentní. **Dipólová relaxační polarizace** vzniká v důsledku určitého přeorientování permanentních dipólů dielektrika do směru aplikovaného vnějšího elektrického pole. Dipóly jsou v tomto typu polarizace považovány za molekuly s různým charakterem vazeb. Na rozdíl od elektronové a iontové polarizace orientace permanentních dipólů není téměř okamžitá, ale probíhá v závislosti na čase, protože možnosti pohyblivosti těchto dipólů jsou velmi závislé na viskozitě média. Dochází tedy k určitému zpoždění přeorientování dipólů do směru vnějšího elektrického pole. Existuje několik druhů dipólových relaxačních polarizací, které bývají v technické literatuře označovány např. jako  $\beta$ -relaxace nebo  $\gamma$ -relaxace.  $\beta$ -relaxace je způsobena pohybem pouze určitého druhu dipólů [39].  $\gamma$ -relaxace vzniká pohybem pouze určitého druhu dipólů, které jsou ale obvykle menších rozměrů než ty, které se podílejí na  $\beta$ -relaxaci [35]. Je možné, že se v dielektrické odezvě dielektrika může projevit více těchto relaxací. Tyto relaxace lze pak označit např. jako  $\beta^*$ -relaxace [39]. Dipólová relaxační polarizace velmi přispívá k celkové dielektrické odezvě, je velice závislá na teplotě okolního prostředí a frekvenci vnějšího elektrického pole. Čas ustálení této polarizace je  $10^{-12}$  až  $10^{-8}$  sekund. [22, 32-36, 40, 41]

**Iontová relaxační polarizace** se vyskytuje v látkách skládajících se z iontů nebo v látkách, které obsahují skupiny atomů či molekul, např. volné ionty nečistot nebo příměsí,

slabě vázaných k sousedním stavebním částicím látky. Iontová relaxační polarizace se vyskytuje např. u anorganických skel, keramických látek s obsahem skloviny nebo u anorganických krystalických látek s iontovou vazbou a netěsným uložením částic. Podstatnou společnou vlastností všech těchto látek je určitá netěsnost vazeb, které váží jednotlivé částice látky dohromady. Tato polarizace je velice závislá na teplotě okolního prostředí, protože s rostoucí teplotou chaotický tepelný pohyb slabě vázaných částic převládne nad silami vnějšího elektrického pole, které se snaží o jejich uspořádání. Kromě závislosti na teplotě je tato polarizace závislá i na frekvenci vnějšího elektrického pole. [22]

### 3.4.3 Migrační polarizace

V dielektriku se kromě dipólů (vázaných nosičů elektrického náboje) mohou polarizačních procesů účastnit i volné nosiče elektrického náboje (elektrony, ionty, koloidní částice). Volné nosiče elektrického náboje jsou buď v dielektriku přítomny, vznikají disociací dipólů vlastního dielektrika či disociací příměsí a nečistot nebo se do dielektrika dostanou vstříkáváním z přiloženého elektrodového systému. Při vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole dochází k migraci těchto volných nosičů elektrického náboje směrem k opačně nabitě elektrodě elektrodového systému. Tento pohyb volných nosičů elektrického náboje se nazývá elektrickým proudem. Migrační polarizace se rozděluje na Maxwell-Wagner-Sillars a elektrodovou polarizaci. [22, 32, 34, 36, 40, 42-44]

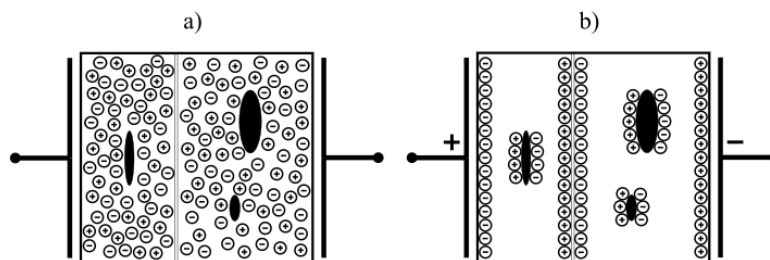
V reálném dielektriku se nachází mnohé nehomogenity, např. vzduchová bublinka, prasklina, příměs nebo nečistota. Na těchto nehomogenitách se pak migrující volné nosiče elektrického náboje zachycují, protože se jedná o rozhraní dvou oblastí s rozdílnými vlastnostmi, ve kterých mají volné nosiče elektrického náboje rozdílnou pohyblivost. Dochází ke kumulaci volných nosičů elektrického náboje na určitém místě a vytvoří se tak určitý prostorový náboj. Tento prostorový náboj je nositelem polarizace dielektrika – vzniká **Maxwell-Wagner-Sillars polarizace**. Ke kumulaci pohybujících se volných nosičů elektrického náboje dochází samozřejmě i na rozhraní dvou typů dielektrik s rozdílnými vlastnostmi. [22, 32, 34, 36, 40, 42-44] Maxwell-Wagner-Sillars polarizace je pomalejší než deformační i relaxační polarizace [35] a stejně jako relaxační polarizace je velmi závislá na teplotě okolního prostředí a frekvenci vnějšího elektrického pole. Tato polarizace významně přispívá k dielektrickým ztrátám především u vícefázových dielektrik. [22, 43]

**Elektrodová polarizace** vzniká akumulací volných nosičů elektrického náboje na rozhraní dielektrika a měřicích elektrod. Akumulace volných nosičů elektrického náboje způsobí vznik dvojité elektrické vrstvy, která může způsobit růst celkové schopnosti



dielektrika se polarizovat a dielektrických ztrát. Elektrodová polarizace je silně závislá na kvalitě a čistotě měřicích elektrod. Pokud jsou při měření použity elektrody o dostatečné kvalitě a čistotě, elektrodová polarizace se patrně vůbec neprojeví. [32, 34, 35, 43, 45]

Na obr. 3.4.3 je nehomogenní dielektrikum, které se nachází: a) bez vlivu, b) pod vlivem působení vnějšího elektrického pole. Na obrázku je schematicky zobrazen princip Maxwell-Wagner-Sillars i elektrodové polarizace.



Obr. 3.4.3 Nehomogenní dielektrikum a) bez vlivu vnějšího elektrického pole, b) pod vlivem vnějšího elektrického pole [22]

### 3.5 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou klíčovou vlastností dielektrik z hlediska jejich použití v praxi. Po vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole se část elektrické energie změní, v důsledku probíhajících polarizačních mechanismů v dielektriku, na ztrátovou tepelnou energii. Tyto ztrátové tepelné energie se označují jako ztráty dielektrické. Dielektrické ztráty se vyskytují ve stejnosměrném i střídavém elektrickém poli a jsou způsobeny pohybem volných a vázaných nosičů elektrického náboje. Velikost dielektrických ztrát a jejich mechanismus je závislý na vlastnostech dielektrika, např. chemická podstata, skupenství, struktura nebo koncentrace příměsí a nečistot. Dielektrické ztráty jsou spojeny s elektrickou vodivostí (vodivostní ztráty), relaxačními polarizacemi (polarizační ztráty) a částečnými výboji (ionizační ztráty). Jejich celková velikost je dána sumou těchto současně působících mechanismů. Tyto mechanismy jsou také příčinou změny fázového posuvu mezi napětím a proudem o určitý ztrátový úhel  $\delta$  ( $^{\circ}$ ). [22, 24, 25]

**Vodivostní ztráty** mají zásadní podíl na celkové velikosti dielektrických ztrát. Tyto dielektrické ztráty vznikají vlivem vodivostního proudu, který dielektrikem protéká. U pevného dielektrika se může projevit i proud, který teče po jeho povrchu. Vodivostní proudy se vyskytují u všech druhů dielektrik a z hlediska uplatnění v praxi je klíčová velikost měrné elektrické vodivosti zkoumaného dielektrika. Měrná elektrická vodivost dielektrika je přímo úměrná vodivostním ztrátám. Hlavní fyzikální podstata vzniku těchto ztrát spočívá v tom, že dochází ke srážkám volných nosičů elektrického náboje

s kmitajícími vázanými nosiči elektrického náboje. Tyto srážky způsobují zahřívání dielektrika a mohou končit až tepelnou degradací. **Polarizační ztráty** způsobují relaxační a migrační polarizace. Deformační polarizace jsou velmi rychlé a na polarizačních ztrátách se podílejí minimálně. [22, 24]

**Ionizační ztráty** vznikají v důsledku výbojové činnosti, tzv. částečnými výboji. Vyskytují se u kapalných nebo pevných dielektrik, která obsahují ve větším či menším množství plynové dutinky a různé nehomogenity. Každá z těchto plynových dutinek nebo nehomogenit má svoji úroveň tzv. počátečního napětí a k výbojové činnosti dojde, jestliže se napětí zvýší nad tuto úroveň. Důsledkem částečných výbojů je prudký nárůst teploty v okolí výbojové činnosti. Částečné výboje mají také abrazivní a chemické účinky. Při působení ionizačních ztrát tedy dochází k nevratnému zhoršení dielektrických vlastností dielektrika. [22, 46]

### 3.5.1 Dielektrické ztráty kapalných dielektrik

Dielektrické ztráty kapalných dielektrik závisí na tom, zda se jedná o dielektrika polární nebo nepolární, na množství a druhu příměsí a nečistot a také na vnějších podmínkách, např. intenzita přiloženého vnějšího elektrického pole, frekvence tohoto pole, teplota okolního prostředí. U dostatečně čistých nepolárních kapalných dielektrik jsou polarizační, vodivostní a ionizační ztráty velmi malé. U polárních kapalných dielektrik se vyskytují polarizační, vodivostní a ionizační ztráty v mnohem větší míře. Dielektrické ztráty a schopnost polarizace polárních kapalných dielektrik jsou mnohem větší než u kapalných dielektrik nepolárních. [22, 40]

Vodivostní ztráty kapalných dielektrik nastávají vlivem pohybu volných nosičů elektrického náboje. Volné nosiče elektrického náboje většinou vznikají disociací molekul vlastního kapalného dielektrika nebo disociací elektrolytických nečistot, které jsou v kapalném dielektriku dispergovány. Polarizační ztráty u kapalných dielektrik jsou způsobeny hlavně dipólovou relaxační nebo migrační polarizací. Dipólová relaxační polarizace kapalných dielektrik je zapříčiněna pohybem polárních molekul. Dielektrické ztráty jsou způsobeny vzniklým fázovým rozdílem mezi polárními molekulami a přiloženým vnějším elektrickým polem. Maxwell-Wagner-Sillars polarizace kapalných dielektrik vzniká hromaděním volných nosičů elektrického náboje na mikroskopických sekundárních fázích, které jsou uvnitř vlastního kapalného dielektrika dispergované. Tyto mikroskopické sekundární fáze se vyznačují jinými vlastnostmi, než má vlastní kapalně dielektrikum. [22, 40]

### 3.6 Elektrická vodivost dielektrik

Celková dielektrická odezva měřeného dielektrika je dána superpozicí jednotlivých polarizačních mechanismů a vodivostní složky. Vodivostní složka přispívá v oblastech nízkých frekvencí nebo vysokých teplot měřeného spektra k celkovým dielektrickým ztrátám velmi značně [35]. V ideálním případě má dielektrikum nulovou elektrickou vodivost, protože neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje a ani žádné nežádoucí příměsi a znečištění. Reálně používaná dielektrika však mají určitou elektrickou vodivost. Elektrická vodivost dielektrik může být buď čistě elektronová, iontová nebo kombinovaná a projevuje se ve stejnosměrném i střídavém elektrickém poli. Vzhledem k zaměření této práce je pozornost soustředěna na elektrickou vodivost kapalných dielektrik. Pro hodnocení dielektrik z hlediska elektrické vodivosti se používá měření měrného elektrického odporu nebo je možné udělat hodnocení dielektrik podle typu volných nosičů elektrického náboje. [22, 24]

#### 3.6.1 Hodnocení dielektrik z hlediska velikosti měrné elektrické vodivosti

Měrná elektrická vodivost (neboli konduktivita) je vhodná veličina pro porovnání hodnoty elektrické vodivosti dielektrik mezi sebou. Rozlišuje se mezi měrnou elektrickou vodivostí vnitřní  $\sigma$  ( $S \cdot m^{-1}$ ) a povrchovou  $\sigma_p$  ( $S \cdot m^{-1}$ ). Měrná vnitřní elektrická vodivost se vyskytuje u plyných, kapalných a pevných dielektrik. Měrná povrchová elektrická vodivost se nachází pouze u dielektrik pevných a vzhledem k zaměření této práce zde není popsána. Měrná vnitřní elektrická vodivost se počítá z velikosti měrného vnitřního elektrického odporu (neboli vnitřní rezistivity). Měrný vnitřní elektrický odpor –  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ). Vzájemný vztah mezi měrnou vnitřní elektrickou vodivostí a měrným vnitřním elektrickým odporem je:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} . \quad (3.6.1)$$

Pro výpočet měrného vnitřního elektrického odporu deskového kondenzátoru platí vztah:

$$\rho = R_i \cdot \frac{S}{d} , \quad (3.6.2)$$

kde  $R_i$  ( $\Omega$ ) značí izolační elektrický odpor dielektrika,  $S$  ( $m^2$ ) je plocha měřicích elektrod a  $d$  (m) je jejich vzdálenost daná tloušťkou měřeného vzorku. Izolační elektrický odpor se vypočítá podle vzorce:

$$R_i = \frac{U}{I}, \quad (3.6.3)$$

kde  $U$  (V) znamená stejnosměrné napětí přiložené na dielektrikum a  $I$  (A) je ustálený stejnosměrný proud procházející dielektrikem. Pro získání velikosti měrného vnitřního elektrického odporu dielektrika se musí vždy provést přepočítání izolačního elektrického odporu dielektrika na uvažovaný rozměr zkoušeného vzorku (podle vzorce 3.6.2). Měrný vnitřní elektrický odpor je tedy redukován na určitou objemovou jednotku dielektrika. Pomocí izolačního elektrického odporu nelze mezi sebou dielektrika objektivně porovnávat, pokud nejsou k dispozici zkušební vzorky naprosto stejných rozměrů. Objektivní porovnávání měrné vnitřní elektrické vodivosti několika dielektrik lze provést pouze pomocí hodnoty měrného vnitřního elektrického odporu. [22, 24, 47, 48]

### 3.6.2 Hodnocení dielektrik z hlediska typu volných nosičů elektrického náboje

V případě hodnocení dielektrik z hlediska typu volných nosičů elektrického náboje se určuje druh elektrické vodivosti na základě toho, který typ volných nosičů elektrického náboje se podílí na vedení elektrického proudu. Rozlišuje se elektrická vodivost elektronová, iontová a elektroforetická. V případě elektronové vodivosti je elektrický náboj přenášen pomocí elektronů. Elektronová vodivost dielektrika většinou převládá ve slabém elektrickém poli za vyšších teplot nebo v silném elektrickém poli za normálních teplot. Pokud se jedná o iontovou vodivost dielektrika, je elektrický náboj přemístěn pomocí iontů. Volné ionty vznikají buď uvolněním iontů ze základní mřížky, ke kterému dochází především za působení vyšších teplot, nebo uvolněním iontů přísadových. Přísadové ionty vznikají disociací příměsí a nečistot a k jejich uvolnění stačí pouze normální teploty. Ve slabých elektrických polích jsou nejběžnějšími volnými nosiči elektrického náboje ionty, v silnějších elektrických polích může docházet ke vstřikování elektronů do dielektrika z přiloženého elektrodového systému. V případě elektroforetické vodivosti je elektrický náboj přenášen určitými shluky molekul (koloidní částice). [22-25, 49]

Pohyb a vznik volných nosičů elektrického náboje velmi záleží na skupenství. V různých skupenstvích se vyskytují jiné vzdálenosti částic (rozdílná vnitřní viskozita mezi nimi) a z toho plyne, že je různá možnost vzájemného ovlivňování částic mezi sebou. Skupenství se rozděluje na plynné, kapalné a pevné. [19, 20, 22, 26]

### 3.6.3 Elektrická vodivost kapalných dielektrik

Elektrická vodivost kapalných dielektrik závisí na struktuře daného dielektrika, obsahu vody, příměsí a nečistot. Je způsobena pohybem volných nosičů elektrického náboje, které mohou vzniknout vlivem ionizačních činitelů, např. působením elektrického pole. Volné nosiče elektrického náboje mohou v dielektriku vznikat: a) ionizací původně neutrálních částic, b) disociací molekul vlastního kapalného dielektrika, c) disociací příměsí a nečistot v kapalném dielektriku obsažených, d) tepelným vybuzením elektronů nebo emisí elektronů z elektrodového systému. U kapalných dielektrik se projevuje iontová nebo elektroforetická vodivost podle toho, zda jsou nositeli elektrického náboje ionty nebo určité shluky molekul (koloidní částice). Iontová vodivost se dále dělí na vlastní a nevlastní. Vlastní vodivost je způsobena pohybem iontů, které vznikají při disociaci molekul vlastního kapalného dielektrika. Nevlastní vodivost je určena pohybem iontů, které vznikají ionizací příměsí a různých nečistot, které jsou v kapalném dielektriku obsaženy. Van der Waalova mezimolekulová síla je u kapalných dielektrik mnohem větší než u plynných dielektrik. Elektrická vodivost kapalných dielektrik silně závisí na teplotě. Pro elektroizolační použití se hodí dielektrické kapaliny, které obsahují molekuly převážně s kovalentními vazbami a nemají příliš velký dipólový moment. [22, 24, 40]

### 3.7 Dielektrikum ve stejnosměrném elektrickém poli

Po vložení dielektrika do vnějšího stejnosměrného elektrického pole získá toto dielektrikum z makroskopického hlediska makroskopický dipólový moment  $M$  (C·m). Makroskopický dipólový moment je zorientovaný ve směru působení vnějšího stejnosměrného elektrického pole a je vztažen k celému objemu dielektrika  $V$  (m<sup>3</sup>). Celková polarizace dielektrika  $P$  (C·m<sup>-2</sup>) se vypočítá podle vztahu:

$$P = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}. \quad (3.7.1)$$

Mezi celkovou polarizací dielektrika a intenzitou elektrického pole  $E$  (V·m<sup>-1</sup>) platí vztah:

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E, \quad (3.7.2)$$

kde  $\varepsilon_0$  (F·m<sup>-1</sup>) je permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12}$ ) a  $\chi$  (-) představuje určitý koeficient polarizace (dielektrická susceptibilita), která je pro vakuum a přibližně také pro vzduch rovna nule a pro ostatní látky větší než nula. Intenzita elektrického pole vyjadřuje směr a velikost vnějšího elektrického pole. Pro výpočet elektrické indukce  $D$  (C·m<sup>-2</sup>), která charakterizuje účinky tohoto vnějšího elektrického pole v dielektriku, platí vztahy:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (3.7.3)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}, \quad (3.7.4)$$

kde  $\varepsilon$  ( $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ) je permitivita dielektrika. Podle vztahu (3.7.4) značí permitivita dielektrika podíl mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole. Vyjadřuje schopnost dielektrika se polarizovat. Dále platí vztah:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r, \quad (3.7.5)$$

kde  $\varepsilon_r$  (-) je tzv. relativní permitivita, která se vypočítá podle vztahu:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (3.7.6)$$

kde  $C_0$  (F) značí kapacitu kondenzátoru, který má jako dielektrikum vakuum. Kapacita  $C_0$  se vypočítá podle vztahu:

$$C_0 = \frac{Q_0}{U}, \quad (3.7.7)$$

kde  $U$  (V) je elektrické napětí mezi elektrodami kondenzátoru a  $Q_0$  (C) vyjadřuje nabíjecí elektrický náboj na elektrodách kondenzátoru, jestliže je mezi nimi umístěno vakuum. Pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru s vakuem jako dielektrikem se používá vztah:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (3.7.8)$$

kde  $S$  ( $\text{m}^2$ ) je plocha měřicích elektrod a  $d$  (m) je jejich vzdálenost dána tloušťkou měřeného vzorku.  $C_x$  (F) představuje kapacitu kondenzátoru s reálným dielektrikem a vypočítá se podle vztahu:

$$C_x = \frac{Q_x}{U}, \quad (3.7.9)$$

kde  $Q_x$  (C) značí nabíjecí elektrický náboj na elektrodách kondenzátoru, jestliže je mezi nimi vložené reálné dielektrikum. Pro výpočet kapacity kondenzátoru s reálným dielektrikem se také používá vztah:

$$C_x = \varepsilon_r \cdot C_0, \quad (3.7.10)$$

který vychází z rovnice (3.7.6). Po dosazení rovnice (3.7.8) do rovnice (3.7.10) vyjde vztah pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru s reálným dielektrikem:

$$C_x = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}. \quad (3.7.11)$$

Po dosazení rovnice (3.7.2), (3.7.4) a (3.7.5) do rovnice (3.7.3) vyjde vztah:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mathbf{E} = \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E}, \quad (3.7.12)$$

a jestliže se celá rovnice (3.7.12) vydělí součinem ( $\epsilon_0 \cdot E$ ), vznikne vztah mezi relativní permitivitou a dielektrickou susceptibilitou:

$$\epsilon_r = 1 + \chi. \quad (3.7.13)$$

[22, 27, 28, 33, 36, 50-53]

### 3.7.1 Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli

V případě působení vnějšího stejnosměrného elektrického pole na dielektrikum je hlavní příčinou dielektrických ztrát elektrická vodivost dielektrika. Stejnosměrný ztrátový výkon  $P_{ZSS}$  (W) spotřebovaný v objemu dielektrika se vypočítá podle vztahu:

$$P_{ZSS} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (3.7.14)$$

kde  $R_i$  ( $\Omega$ ) je izolační elektrický odpor dielektrika,  $U$  (V) vyjadřuje stejnosměrné napětí přiložené na dielektrikum a  $I$  (A) je ustálený stejnosměrný proud procházející dielektrikem. Deformační polarizace jsou velmi rychlé a prakticky zcela bezztrátové. Relaxační polarizace se na dielektrických ztrátách dielektrika ve stejnosměrném elektrickém poli podílejí poměrně málo, protože se neprojevují kinetické vlastnosti částic v důsledku změny polarity elektrod elektrodového systému. Ve stejnosměrném elektrickém poli se mohou v dielektriku uplatnit i ztráty ionizační, které jsou však v porovnání s vodivostními ztrátami zanedbatelné. [22, 24, 52, 53]

### 3.8 Dielektrikum ve střídavém elektrickém poli

Pod vlivem vnějšího střídavého elektrického pole se dielektrikum chová rozdílně oproti vlivu vnějšího stejnosměrného elektrického pole. Vhodné dielektrikum je umístěno do elektrodového systému a společně s elektrodovým systémem tvoří kondenzátor. Dielektrikum se pod vlivem zdroje střídavého napětí nabije (jako v poli stejnosměrném), pak se ale polarita zdroje změní a dielektrikum se vybijí a následně nabije opačně. Dielektrikum se periodicky nabíjí a vybíjí a rychlost tohoto procesu závisí na frekvenci zdroje. Popis mechanismů dielektrika pod vlivem vnějšího střídavého elektrického pole je mnohem náročnější než u pole stejnosměrného, protože je nutné vzít v úvahu kinetické vlastnosti částic v důsledku změny polarity na elektrodách a velikost frekvence střídavého pole. Při působení vnějšího střídavého elektrického pole jsou celkové dielektrické ztráty v dielektriku vyjádřeny součtem polarizačních, vodivostních a ionizačních ztrát. Obecně platí: Dielektrické ztráty v dielektriku ve střídavém elektrickém poli jsou podstatně větší

oproti dielektrickým ztrátám, které způsobuje stejnosměrné elektrické pole. [22, 24] Komplexní veličiny jsou v této práci značeny hvězdičkou.

Setrvačnost částic je příčinou fázového zpoždění komplexní elektrické indukce  $D^*$  ( $C \cdot m^{-2}$ ) za komplexní intenzitou elektrického pole  $E^*$  ( $V \cdot m^{-1}$ ) o určitý ztrátový úhel  $\delta$  ( $^\circ$ ). Intenzita elektrického pole vyjadřuje směr a velikost vnějšího elektrického pole a elektrická indukce charakterizuje účinky tohoto vnějšího elektrického pole v dielektriku. Pomocí symbolicko-komplexní metody lze tyto veličiny vyjádřit podle vztahů:

$$E^* = E_m \cdot e^{i(\omega \cdot t)}, \quad (3.8.1)$$

$$D^* = D_m \cdot e^{i(\omega \cdot t - \delta)}, \quad (3.8.2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (3.8.3)$$

kde  $t$  (s) vyjadřuje čas,  $\omega$  ( $rad \cdot s^{-1}$ ) znamená úhlovou frekvenci vnějšího elektrického pole,  $f$  (Hz) je frekvence vnějšího elektrického pole a písmenem  $m$  se značí maximální hodnoty daných veličin. Pro různé časy a frekvence se bude samozřejmě intenzita elektrického pole a elektrická indukce měnit. Dále platí vztah, který je velmi podobný vztahu (3.8.4) platícímu pro stejnosměrné elektrické pole:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* = \frac{D^*}{E^*}, \quad (3.8.4)$$

kde  $\varepsilon_0$  ( $F \cdot m^{-1}$ ) je permitivita vakua a  $\varepsilon^*$  (-) je komplexní permitivita. Komplexní dielektrická susceptibilita  $\chi^*$  (-) se vypočítá podle vztahu:

$$\chi^* = \varepsilon^* - 1, \quad (3.8.5)$$

který je komplexní tvar rovnice (3.7.13). Podle rovnice (3.8.4), (3.8.1) a (3.8.2) platí vztah:

$$D_m \cdot e^{i(\omega \cdot t - \delta)} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* \cdot E_m \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t}. \quad (3.8.6)$$

Po úpravě rovnice (3.8.6) platí vztah:

$$D_m \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \cdot e^{-i \cdot \delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* \cdot E_m \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t}, \quad (3.8.7)$$

kde člen  $e^{i \cdot \omega \cdot t}$  lze na obou stranách rovnice vykrátit a pro rovnice pak platí vztah:

$$D_m \cdot e^{-i \cdot \delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* \cdot E_m. \quad (3.8.8)$$

[22, 43, 50, 54]

Komplexní permitivita  $\varepsilon^*$  (-) se vypočítá podle vztahu:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i \cdot \varepsilon'', \quad (3.8.9)$$

kde  $\varepsilon'$  (-) je reálná složka komplexní permitivity (relativní permitivita) a  $\varepsilon''$  (-) představuje imaginární složku komplexní permitivity (ztrátové číslo). Reálná složka komplexní



permitivity vyjadřuje schopnost dielektrika se polarizovat ve vnějším střídavém elektrickém poli. Ve střídavých elektrických polích má  $\varepsilon'$  (-) stejný význam jako  $\varepsilon_r$  (-) v polích stejnosměrných. Imaginární složka komplexní permitivity určuje míru dielektrických ztrát v dielektriku, které je namáhané vnějším střídavým elektrickým polem. [22, 35, 45, 47, 55] Reálnou složku komplexní permitivity lze definovat vztahem:

$$\varepsilon' = \varepsilon'_d + \varepsilon'_i, \quad (3.8.10)$$

kde  $\varepsilon'_d$  (-) značí reálnou složku komplexní permitivity, na které se podílí pouze polarizační mechanismy a  $\varepsilon'_i$  (-) je reálná složka komplexní permitivity, na kterou mají vliv pouze vodivostní mechanismy. Imaginární složku komplexní permitivity je možné definovat vztahem:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_d + \varepsilon''_i, \quad (3.8.11)$$

kde  $\varepsilon''_d$  (-) představuje imaginární složku komplexní permitivity, kterou ovlivňují pouze polarizační mechanismy a  $\varepsilon''_i$  (-) je imaginární složka komplexní permitivity, na které se podílí pouze vodivostní mechanismy. [56]

Komplexní permitivitu je možné vyjádřit i pomocí vztahu:

$$\varepsilon^* = \frac{C^*}{C_0} \quad [43], \quad (3.8.12)$$

kde  $C^*$  (F) je komplexní kapacita a  $C_0$  (F) určuje kapacitu příslušného kondenzátoru, jestliže je jeho dielektrikum vakuum. Kapacita  $C_0$  (F) se vypočítá u deskového kondenzátoru podle vztahu:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (3.8.13)$$

kde  $\varepsilon_0$  (F·m<sup>-1</sup>) udává permitivitu vakua,  $S$  (m<sup>2</sup>) je plocha měřících elektrod a  $d$  (m) je jejich vzdálenost daná tloušťkou měřeného vzorku. Komplexní kapacita je určena podle vzorce:

$$C^* = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot Z^*} \quad [43], \quad (3.8.14)$$

kde  $Z^*$  ( $\Omega$ ) je komplexní impedance, která se udává podle vztahu:

$$Z^* = \frac{U^*}{I^*}, \quad (3.8.15)$$

kde  $U^*$  (V) a  $I^*$  (A) jsou komplexní veličiny napětí a proudu. Jestliže se dosadí rovnice (3.8.14) do rovnice (3.8.12), vyjde vztah:

$$\varepsilon^* = \frac{-i}{\omega \cdot Z^*} \cdot \frac{1}{C_0} \quad [57]. \quad (3.8.16)$$

Když se dosadí rovnice (3.8.13) a (3.8.15) do rovnice (3.8.16), platí vztah:

$$\varepsilon^* = \frac{\frac{I^*}{U^*}}{\frac{i \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}}. \quad (3.8.17)$$

Po dosazení rovnice (3.8.9) do rovnice (3.8.8) vyjde vztah:

$$D_m \cdot e^{-i\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot E_m - i \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E_m. \quad (3.8.18)$$

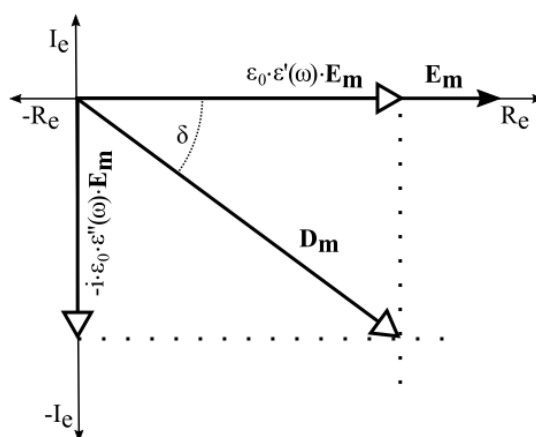
Grafická interpretace vztahu (3.8.18) je zachycena na obr. 3.8.1. Z grafické interpretace komplexní permitivity (obr. 3.8.1) je možno určit ze ztrátového úhlu  $\delta$  ( $^\circ$ ) ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  (-), který vyjadřuje v absolutní hodnotě vztah reálné a imaginární složky komplexní permitivity podle vztahu:

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E_m}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot E_m}. \quad (3.8.19)$$

Po úpravě rovnice (3.8.19) platí vztah:

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (3.8.20)$$

[22, 36, 43, 47]



Obr. 3.8.1 Grafická interpretace komplexní permitivity [36]

### 3.8.1 Debye rovnice

Pro výpočet komplexní permitivity se také používají vzorce, které berou v úvahu přímo tvar naměřených charakteristik reálné a imaginární složky komplexní permitivity v závislosti na frekvenci vnějšího střídavého elektrického pole, např. Debye, Cole-Cole, Cole-Davidson nebo Havriliak-Negami rovnice. Pro Debye rovnici platí vztah:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i \cdot \omega \cdot \tau} \quad [22, 58], \quad (3.8.21)$$

kde  $\tau$  (s) určuje dobu relaxačního děje,  $\varepsilon_s$  (-) je hodnota reálné složky komplexní permitivity těsně před započítím uvažovaného relaxačního děje a  $\varepsilon_\infty$  (-) značí konečnou hodnotu reálné složky komplexní permitivity uvažovaného relaxačního děje. Debye rovnice platí pouze pro jeden mechanismus polarizace s jednou relaxační dobou. Všechny dipóly v materiálu tedy musí mít stejnou relaxační dobu. Na obr. 3.8.2 je zobrazen teoretický průběh reálné a imaginární složky komplexní permitivity a ztrátového činitele jednoho relaxačního mechanismu. Rovnice (3.8.21) se dále může rozdělit na reálnou (3.8.22) a imaginární (3.8.23) část:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (3.8.22)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_\infty - \varepsilon_s) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad [22, 58]. \quad (3.8.23)$$

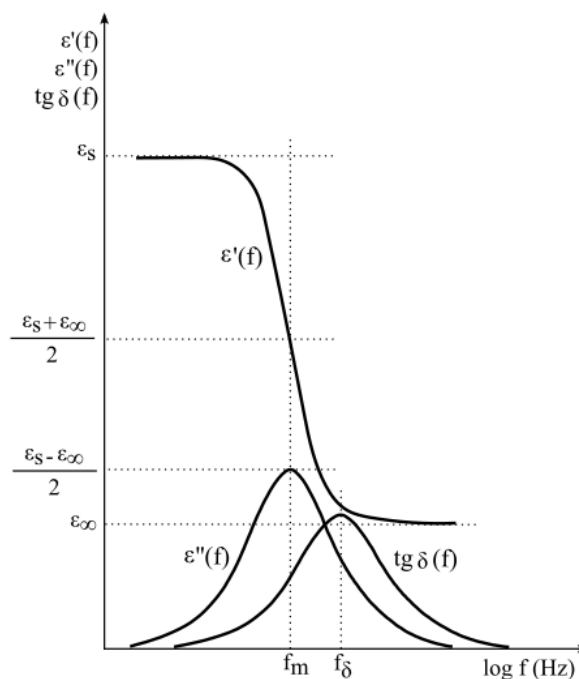
Jak již bylo zmíněno, ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  (-) udává poměr imaginární a reálné složky komplexní permitivity. Z výše uvedených rovnic (3.8.22) a (3.8.23) tedy vyplývá, že ztrátový činitel se v souladu s Debye rovnicí vypočítá podle vztahu:

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_\infty - \varepsilon_s}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}}. \quad (3.8.24)$$

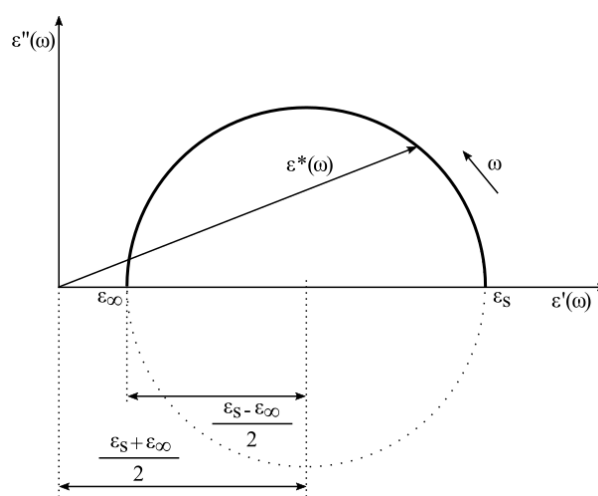
Po několika jednoduchých matematických úpravách vyjde vztah:

$$\text{tg } \delta = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \cdot \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (3.8.25)$$

Debye rovnici odpovídá ideální Cole-Cole diagram (obr. 3.8.3), který má střed kružnice na ose reálné složky komplexní permitivity. U reálných dielektrik se tvar Cole-Cole diagramu velice liší od jeho ideální podoby. Je to způsobeno tím, že reálná dielektrika se skládají z několika rozdílných skupin molekul, které mají různé doby relaxace. Celkový průběh diagramu u reálného dielektrika je tedy dán superpozicí jednotlivých dílčích Debye mechanismů, které mají odlišné doby relaxace. Pro matematický popis látek se složitou strukturou, např. makromolekulární látky, se nejčastěji používá Havriliak-Negami rovnice. [22, 34, 35, 47, 58, 59]



Obr. 3.8.2 Teoretický průběh reálné a imaginární složky komplexní permitivity a ztrátového činitele jednoho relaxačního mechanismu [44, 60]



Obr. 3.8.3 Ideální Cole-Cole diagram [22, 60]

### 3.8.2 Cole-Cole rovnice

Pro Cole-Cole rovnici platí vztah:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i \cdot \omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha}} \quad [44, 58], \quad (3.8.26)$$

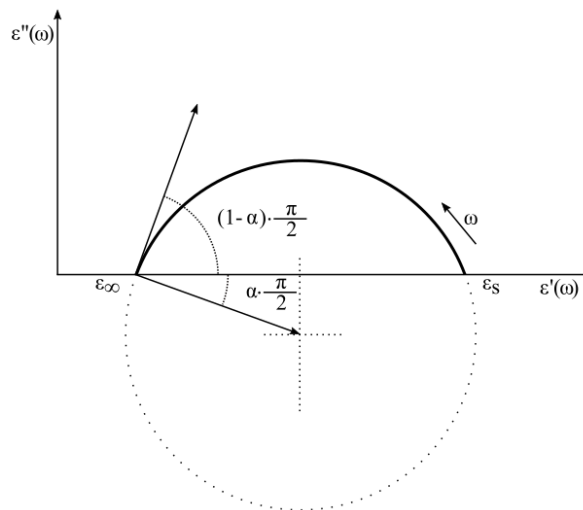
kde  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) představuje distribuční parametr a  $\tau_0$  (s) je nejpravděpodobnější relaxační doba, okolo které jsou relaxační doby rozloženy podle distribuční funkce  $\gamma(\tau)$ . Cole-Cole diagram s jedním distribučním parametrem  $\alpha$  je znázorněn na obr. 3.8.4. Čím větší je tento

distribuční parametr  $\alpha$ , tím více se střed Cole-Cole kružnice posunuje pod osu reálné složky komplexní permitivity. Díky tomuto posunutí středu kružnice, Cole-Cole diagram s jedním distribučním parametrem mnohem lépe vyhovuje naměřeným hodnotám než tvar ideálního Cole-Cole diagramu. Rovnice (3.8.26) se dále může rozdělit na reálnou (3.8.27) a imaginární (3.8.28) část:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot \frac{1 + (\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \pi\right)}{1 + 2 \cdot (\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \pi\right) + (\omega \cdot \tau_0)^{2 \cdot (1-\alpha)}}, \quad (3.8.27)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot \frac{(\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \pi\right)}{1 + 2 \cdot (\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \pi\right) + (\omega \cdot \tau_0)^{2 \cdot (1-\alpha)}} [44, 58]. \quad (3.8.28)$$

[22, 44, 58, 59]



Obr. 3.8.4 Cole-Cole diagram s jedním distribučním parametrem [22, 60]

### 3.8.3 Cole-Davidson rovnice

Pro Cole-Davidson rovnici platí vztah:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + i \cdot \omega \cdot \tau_0)^{\beta}}, \quad (3.8.29)$$

[44, 58] kde  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ) je tvarový parametr Cole-Davidson diagramu (obr. 3.8.5). Tvarový parametr  $\beta$  charakterizuje sklon tečny kružnice, která prochází bodem  $\varepsilon_{\infty}$  (-). Rovnice (3.8.29) se dále může členit na reálnou (3.8.30) a imaginární (3.8.31) část:

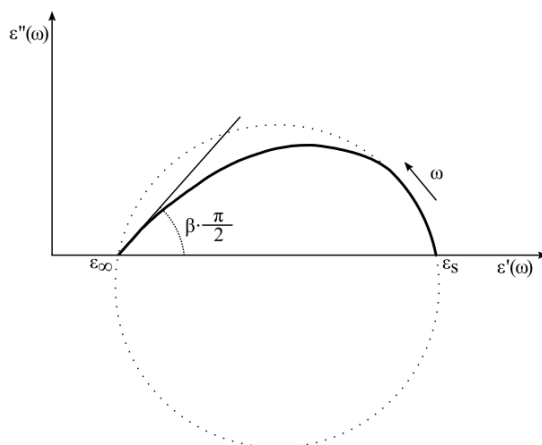
$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \cdot (\cos \varphi)^{\beta} \cdot \cos(\beta \cdot \varphi), \quad (3.8.30)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot (\cos \varphi)^\beta \cdot \sin(\beta \cdot \varphi), \quad (3.8.31)$$

kde

$$\varphi = \arctg(\omega \cdot \tau_0) [44, 58]. \quad (3.8.32)$$

[22, 44, 58, 59]



Obr. 3.8.5 Cole-Davidson diagram [22, 60]

### 3.8.4 Havriliak-Negami rovnice

Pro matematický popis látek se složitou strukturou, např. makromolekulární látky, se nejčastěji používá Havriliak-Negami rovnice. Pro Havriliak-Negami rovnici platí vztah:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left[1 + (i \cdot \omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha}\right]^\beta} [56, 58], \quad (3.8.33)$$

kde  $\alpha$  a  $\beta$  jsou tvarové parametry Havriliak-Negami diagramu (obr. 3.8.6). Parametr  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) charakterizuje sklon tečny kružnice, která prochází bodem  $\varepsilon_s$  (-). Parametr  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ), společně s parametrem  $\alpha$ , ukazují sklon tečny kružnice, která prochází bodem  $\varepsilon_\infty$  (-). Rovnice (3.8.33) se dále může rozdělit na reálnou (3.8.34) a imaginární (3.8.35) část:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \frac{\cos(\beta \cdot \varphi)}{\left[1 + 2 \cdot (\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \pi\right) + (\omega \cdot \tau_0)^{2 \cdot (1-\alpha)}\right]^{\frac{\beta}{2}}}, \quad (3.8.34)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \frac{\sin(\beta \cdot \varphi)}{\left[1 + 2 \cdot (\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \pi\right) + (\omega \cdot \tau_0)^{2 \cdot (1-\alpha)}\right]^{\frac{\beta}{2}}}, \quad (3.8.35)$$

kde

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \alpha\right)}{1 + (\omega \cdot \tau_0)^{1-\alpha} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \alpha\right)} \quad [58]. \quad (3.8.36)$$

Havriliak-Negami rovnice pro  $k$  až  $n$  relaxačních dějů v jednom dielektrickém spektru se vypočítá podle vztahu:

$$\varepsilon^* = \sum_{k=1}^n \left[ \varepsilon_{\infty k} + \frac{\varepsilon_{s k} - \varepsilon_{\infty k}}{\left[1 + (i \cdot \omega \cdot \tau_k)^{1-\alpha_k}\right]^{\beta_k}} \right] \quad [34, 47]. \quad (3.8.37)$$

Reálná dielektrická spektra obsahují i vodivostní složku, které přispívá k celkovým dielektrickým ztrátám velkým měrou. Havriliak-Negami rovnice pro  $k$  až  $n$  relaxačních dějů s vodivostní složkou se řeší podle vztahu:

$$\varepsilon^* = -i \left( \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \cdot \omega} \right)^N + \sum_{k=1}^n \left[ \varepsilon_{\infty k} + \frac{\varepsilon_{s k} - \varepsilon_{\infty k}}{\left[1 + (i \cdot \omega \cdot \tau_k)^{1-\alpha_k}\right]^{\beta_k}} \right] \quad [34, 47], \quad (3.8.38)$$

kde  $\sigma_{dc}$  ( $S \cdot m^{-1}$ ) je stejnosměrná konduktivita dielektrika a exponent  $N$  charakterizuje tvar vodivostní křivky. Nejčastěji se exponent  $N$  udává jako jednička a vodivostní křivka se tak tvarově řeší jako přímka. [22, 34, 35, 47, 56, 58, 59, 61, 62] Komplexní konduktivita  $\sigma^*$  ( $S \cdot m^{-1}$ ) se určuje podle vztahu:

$$\sigma^* = \sigma' + i \cdot \sigma'' = i \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*, \quad (3.8.39)$$

kde

$$\sigma' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'', \quad (3.8.40)$$

$$\sigma'' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \quad [43, 62]. \quad (3.8.41)$$

$\sigma'$  ( $S \cdot m^{-1}$ ) je reálná složka komplexní konduktivity a  $\sigma''$  ( $S \cdot m^{-1}$ ) značí imaginární složku komplexní konduktivity. Reálnou složku komplexní konduktivity dielektrika lze vypočítat také podle vztahu:

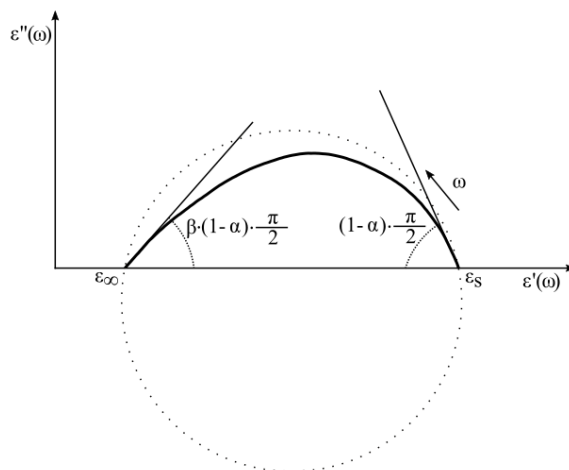
$$\sigma' = \sigma_{dc} + A \cdot \omega^s = \sigma_{dc} \cdot \left[1 + (\omega \cdot \tau)^s\right] \quad [43, 63] \quad (3.8.42)$$

nebo

$$\sigma' = G \cdot \frac{d}{S} \quad [35], \quad (3.8.43)$$

kde  $A$  znamená teplotně závislou konstantu a předexponenciální faktor,  $s$  je teplotně závislý frekvenční exponent ( $0 \leq s \leq 1$ ) a  $\tau$  (s) značí časovou konstantu. Konstanta  $A$  vyjadřuje schopnost zkoumané látky polarizovat se a exponent  $s$  představuje stupeň interakce mezi

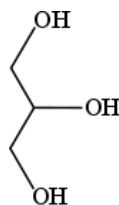
pohyblivými ionty a mřížkami okolo nich. [43, 44, 57, 62, 63]  $G$  (S) je střídavá elektrická vodivost,  $S$  ( $m^2$ ) udává plochu měřicích elektrod a  $d$  (m) jejich vzdálenost, kterou určuje tloušťka měřeného vzorku [35]. V kap. 3.8.2 bylo zmíněno, že reálná dielektrika se skládají z několika rozdílných skupin molekul, které mají různé doby relaxace.



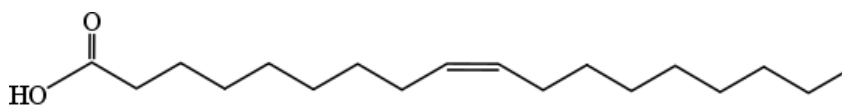
Obr. 3.8.6 Havriliak-Negami diagram [43, 60]

## 4 Základní fluidní systém

Olej je obecně kapalina, která není rozpustná ve vodě, má nižší viskozitu než voda a skládá se z molekul, které obsahují uhlovodíkové řetězce. Řepka olejka (*Brassica napus*) je jednoletá či dvouletá plodina, která je pěstovaná pro olejnatá semena. Olejnatá semena této rostliny je možné využít k výrobě oleje, který je velice dobře biologicky odbouratelný. Řepkový olej se vyrábí lisováním těchto semen a skládá se z triglyceridů, které vznikají z glycerolů (obr. 4.1) a z mastných kyselin hlavně olejové (obr. 4.2), linolové (obr. 4.3) a  $\alpha$ -linolenové (obr. 4.4). Strukturální vzorec řepkového oleje je zobrazen na obr. 4.5. [64, 65]. Je potřeba zdůraznit, že řepka olejka se v prostředí České republiky nachází v hojné míře a není proto nutné ji dovážet. Z těchto důvodů také vyplývá její nízká cena na domácím trhu.

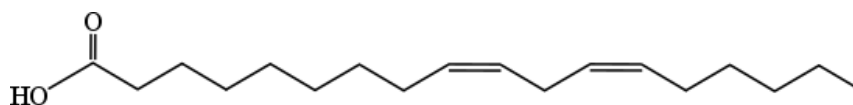


Obr. 4.1 Strukturální vzorec glycerolu

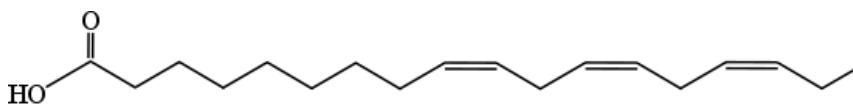
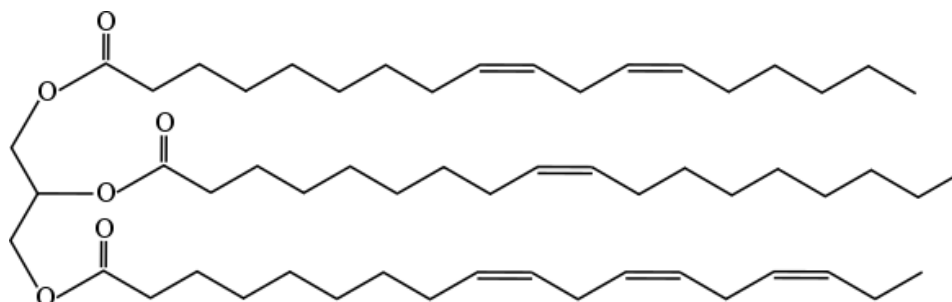


Obr. 4.2 Strukturální vzorec olejové kyseliny





Obr. 4.3 Strukturální vzorec linolové kyseliny

Obr. 4.4 Strukturální vzorec  $\alpha$ -linolenové kyseliny

Obr. 4.5 Strukturální vzorec řepkového oleje

Řepkový olej v potravinářské kvalitě nemůže ovšem přímo sloužit jako biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina – musí se upravit tak, aby výsledný produkt splňoval požadavky normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“ a byla tak umožněna jeho použitelnost jako elektroizolační kapaliny. Výše uvedená norma ČSN EN 62770 doporučuje, aby elektroizolační kapaliny na bázi rostlinných olejů byly používány jako náplň především hermetizovaných, tj. atmosféricky uzavřených, elektrických zařízení.

Výše zmiňovanou úpravou řepkového oleje v potravinářské kvalitě je jeho úprava v perkolačním zařízení (obr. 4.6). Řepkový olej uložený v zásobníku o objemu 200 litrů je čerpán rychlostí 0,5 litrů/min přes kolonu tvaru válce o objemu 50 litrů plněnou sorbentem Alumina CPN (s předchozí termickou aktivací) a následně se vrací do zásobníku. Sorbent Alumina CPN zlepšuje jakostní a elektroizolační parametry oleje a také zbabí olej vlhkosti. Během procesu je olej ohříván na teplotu cca 60 (°C) kvůli snížení viskozity a před návratem do zásobníku prochází filtrem tvořeným skládanou buničinou (obr. 4.7). Olej absolvuje tuto cirkulaci opakovaně a po 24 hodinách provozu se v zásobníku nachází již pouze upravený řepkový olej. Do takto upraveného řepkového oleje je přidán a rozpuštěn antioxidant fenolického typu dibutyl-para-kresol tak, aby jeho výsledná koncentrace činila 0,5 (%) hmotnostních. Antioxidant dibutyl-para-kresol zlepšuje odolnost oleje vůči oxidaci. Po této úpravě splňuje získaný řepkový olej jednak požadavky biologické odbouratelnosti a jeho fyzikálně-chemické parametry odpovídají požadavkům

normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“. Tedy přeskokové napětí minimálně 35 (kV)/2,5 (mm) a ztrátový činitel při 90 (°C) maximálně 0,05.

Tento biologicky odbouratelný elektroizolační olej byl vyvinutý v rámci projektu TAČR TA03020251 s názvem Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí a dostal jméno ENVITRAFOL. Charakteristické vlastnosti ENVITRAFOLU jsou uvedeny v tab. 4.1. ENVITRAFOL je určený pro distribuční transformátory hermetického typu, je retrofitní a neobsahuje korozivní síru. Výhoda proti minerálním olejům není pouze v dobré biologické odbouratelnosti, ale i v menší citlivosti přeskokového napětí k obsahu vlhkosti. Je vhodný zejména pro oblasti se zvýšenou ochranou životního prostředí – intravilány obcí, chráněná území.

Tab. 4.1 Charakteristické vlastnosti ENVITRAFOLU

parametr	limitní hodnota ČSN EN 62770	ENVITRAFOL
před testem oxidační stability		
vzhled	čisté, bez sedimentů a suspenzí	splňuje
viskozita při 100 (°C)	max. 15 (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	8,26
viskozita při 40 (°C)	max. 50 (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	35,84
bod tekutosti	max. -10 (°C)	-24
obsah vody	max. 200 (mg·kg <sup>-1</sup> )	45,8
hustota při 20 (°C)	max. 1 (g·ml <sup>-1</sup> )	0,915
přeskokové napětí	max. 35 (kV)/2,5 (mm)	52,51
ztrátový činitel při 90 (°C)	max. 0,05 (-)	0,0188
číslo kyselosti	max. 0,06 (mg KOH·goleje <sup>-1</sup> )	0,011
korozní síra / DBDS	nepřítomna	nepřítomna
aditiva – antioxidant DBPC	max. hmotnostní podíl 5 (%)	0,53
aditiva celkem	max. hmotnostní podíl 5 (%)	Pouze DBPC
po testu oxidační stability		
číslo kyselosti	max. 0,06 (mg KOH·goleje <sup>-1</sup> )	0,041
viskozita při 40 (°C)	max. navýšení původní hodnoty o 30 (%)	35,30
ztrátový činitel při 90 (°C)	max. 0,5 (-)	0,0216



Obr. 4.6 Perkolační zařízení



Obr. 4.7 Filtr tvořený skládanou buničinou

## 5 Modifikace základního fluidního systému

Do řepkového oleje, upraveného podle kapitoly 4, bylo dispergováno určité množství nanopřísad různých typů ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ). Nejprve byly vyhodnocované nanopřísady a inhibovaný řepkový olej o objemu 440 (ml) vloženy do sušky Venticell od firmy MMM Group (obr. 5.1) na osmnáct hodin při teplotě 110 ( $^{\circ}\text{C}$ ). Poté byl olej a nanopřísady ze sušky vyjmuty a ponechány deset minut při pokojové teplotě, aby zchladly na manipulovatelnou teplotu. Dále byly nanopřísady naváženy na požadovanou hmotnost na mikrováze ALJ 120-4 od firmy Kern (obr. 5.2) a umístěny do inhibovaného řepkového oleje. Do tohoto fluidního systému s nanopřísadami bylo ponořeno míchadlo s dvojitou šroubovicí R 3003 od firmy IKA (obr. 5.3) umožňující prostorové míchání, které je uskutečněno tvarem míchadla. Pomocí hřídelové míchačky Eurostar 40 digital od firmy IKA (obr. 5.4) byl fluidní systém s nanopřísadami míchán po dobu jedné hodiny. Po skončení míchání bylo míchadlo s dvojitou šroubovicí umyto vodou a jarem. Poté bylo

vyčištěno cyklohexanem a umístěno do ultrazvukové vany přístroje VGT-1990QT od firmy Manufacture expert (obr. 5.5) po dobu jedné hodiny. Následně bylo opět vyčištěné cyklohexanem a pro uschnutí bylo umístěno do sušky Venticell od firmy MMM Group ZGS po dobu dvou hodin při teplotě 70 (°C).

Dále byla nádoba s fluidním systémem s nanopřísadami umístěna do ultrazvukové vany přístroje VGT-1990QT od firmy Manufacture expert o ultrazvukovém výkonu 200 (W) a kmitočtu 40 (kHz). Vana byla naplněna demi vodou do požadované výše kvůli dobrému přenosu ultrazvukových vln. Fluidní systém s nanopřísadami byl v této vaně ponechán po dobu dvou hodin. Poté byla nádoba s fluidním systémem s nanopřísadami vložena do vakuové komory Venticell od firmy MMM Group (obr. 5.6) po dobu dvou hodin. Po tomto postupu, který je schematicky znázorněn na obr. 5.7, byl fluidní systém s nanopřísadami připraven k měření. Tento postup přípravy a výroby je pro všechny typy nanopřísad a různé jejich množství vždy stejný.



*Obr. 5.1 Suška Venticell*



*Obr. 5.2 Mikrováha ALJ 120-4*



Obr. 5.3 Míchadlo s dvojitou šroubovicí R 3003



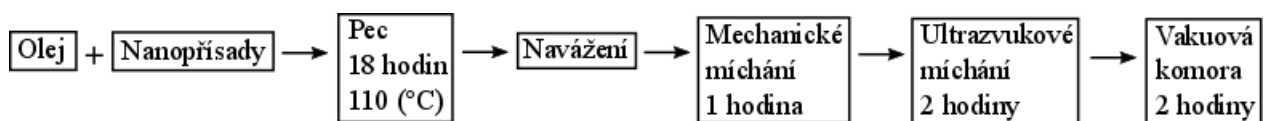
Obr. 5.4 Hřídelová míchačka Eurostar 40 digital



Obr. 5.5 VGT-1990QT



Obr. 5.6 Vakuová komora Venticell



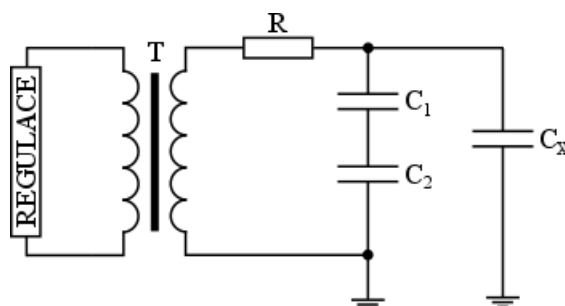
Obr. 5.7 Schematický postup výroby fluidního systému s nanopřísadami

## 6 Diagnostický systém

Po dokončení výroby fluidního systému s nanopřísadami je potřeba zjistit jak se tento fluidní systém chová v elektrickém poli. K tomuto účelu je nutné určit vhodný diagnostický systém a definovat měřené parametry; přeskokové napětí, polarizační index, rezistivita, reálná složka komplexní permitivity, ztrátový činitel.

### 6.1 Přeskokové napětí

Schéma zapojení pro měření přeskokového napětí je zobrazeno na obr. 6.1.1. Pro měření přeskokového napětí vyhodnocovaných vzorků byl použit ovládací modul SM 4 a výkonový modul LM 30 [66] (obr. 6.1.2) na schématu zapojení označeno jako regulace, elektrodový systém pro měření přeskokového napětí kapalných dielektrik (obr. 6.1.3) na schématu zapojení označeno jako ( $C_x$ ), vysokonapěťový transformátor (obr. 6.1.4) na schématu zapojení označeno jako (T), kondenzátorový napěťový dělič (obr. 6.1.5) na schématu zapojení označeno jako ( $C_1$ ,  $C_2$ ) a odpor pro omezení proudu při přeskoku (obr. 6.1.6) na schématu zapojení označeno jako (R). Přístroje pro měření přeskokového napětí kapalných dielektrik ve vysokonapěťovém prostoru jsou zobrazeny na obr. 6.1.7.



Obr. 6.1.1 Schéma zapojení pro měření přeskokového napětí



Obr. 6.1.2 Ovládací modul SM 4 a výkonový modul LM 30



*Obr. 6.1.3 Elektroodový systém pro měření přeskovového napětí kapalných dielektrik*



*Obr. 6.1.4 Vysokonapěťový transformátor*



*Obr. 6.1.5 Kondenzátorový napěťový dělič*



Obr. 6.1.6 Odpor pro omezení proudu při přeskožení



Obr. 6.1.7 Přístroje pro měření přeskovového napětí kapalných dielektrik ve vysokonapěťovém prostoru

Elektrická pevnost je často využívaná fyzikální veličina dielektrika, která charakterizuje schopnost tohoto materiálu bránit průchodu elektrického proudu mezi místy s různou velikostí elektrického potenciálu. Hodnota elektrické pevnosti dielektrika je ovlivněna řadou činitelů. Mezi tyto činitele patří např. charakter, velikost a frekvence přiloženého vnějšího elektrického pole, teplota, vlhkost nebo obsah nečistot a plynů. Přiložené vnější elektrické pole může být např. stejnosměrného, střídavého nebo rázového charakteru. Pokud přiložené vnější elektrické pole překročí určitou kritickou mez namáhaného dielektrika, dojde v tomto dielektriku k prudkému nárůstu množství volných nosičů elektrického náboje a jejich pohyblivosti. Důsledkem tohoto prudkého růstu konduktivity je prudký pokles rezistivity dielektrika, který končí elektrickým výbojem. V tomto okamžiku přestane plnit dielektrikum svoji funkci a dojde k vodivému spojení míst s různým elektrickým potenciálem. [22, 46]

U pevných dielektrik se vodivému spojení mezi měřicími elektrodami říká průraz. Průraz vede k trvalému zhoršení dielektrických vlastností materiálu. U plyných a kapalných dielektrik se vodivému spojení mezi měřicími elektrodami říká přeskok. Přeskok



vede pouze k dočasnému zhoršení dielektrických vlastností, protože plynná a kapalná dielektrika mají schopnost regenerace. Mechanismus elektrického výboje je nejlépe znám u plyných dielektrik, méně u pevných a velice málo u dielektrik kapalných. Elektrická pevnost  $E_p$  ( $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) se vypočítá podle vztahu:

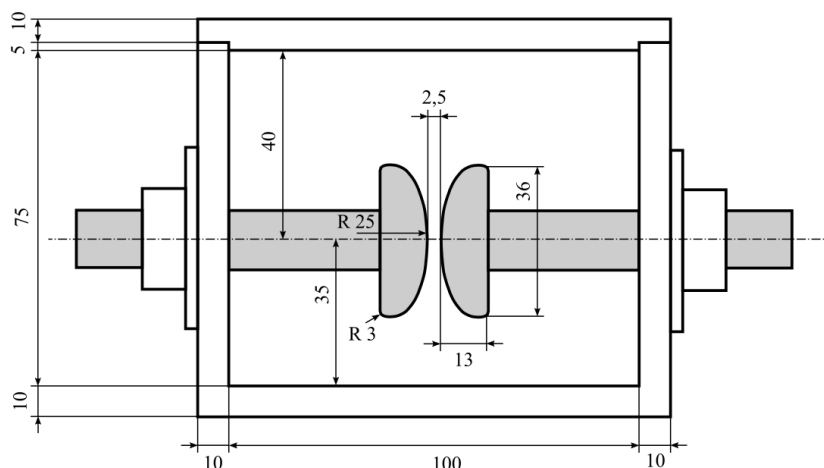
$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (6.1.1)$$

kde  $U_p$  (kV) je velikost průrazného nebo přeskokového napětí zkoušeného vzorku a  $d$  (mm) znamená vzdálenost měřicích elektrod, která je daná tloušťkou měřeného vzorku. Průrazné nebo přeskokové napětí vzorku se definuje jako nejmenší napětí naměřené během zkoušky v okamžiku vzniku prvního elektrického výboje mezi měřicími elektrodami. [22, 46]

### 6.1.1 Přeskokové napětí kapalných dielektrik

Mechanismus elektrického přeskoku v kapalných dielektrikách je složitou záležitostí, která je závislá na velkém množství často náhodných a těžko kontrolovatelných činitelů. Těmito činiteli mohou být např. různá aditiva, nečistoty, vlhkost, teplota, tlak, rozpuštěné a nerozpuštěné plyny, míra znečištění elektrodového systému, provedení elektrodového systému, charakter a doba působení měřicího napětí nebo rozložení elektrického pole v prostoru mezi měřicími elektrodami. Dostupné experimentální výsledky vykazují o mechanismu přeskoku v kapalných dielektrikách nejednoznačné a někdy dokonce i protichůdné závěry. Doposud bylo vytvořeno několik teorií mechanismu přeskoku. Mezi tyto teorie patří plynová hypotéza, plynově-tepelná hypotéza, tepelná hypotéza, hypotéza kapkového můstku, hypotéza emise a nárazové ionizace, hypotéza postavená na teorii průrazu krystalů, hypotéza můstku polarizovaných částic a hypotéza zesilující se emise elektronů z katody. [22]

Pro měření přeskokového napětí kapalných dielektrik se používá elektrodový systém s definovanými semisférickými leštěnými měřicími elektrodami, které se nacházejí v pevné vzdálenosti  $2,5 \text{ (mm)} \pm 0,05 \text{ (mm)}$  od sebe. Vzhled a rozměry elektrodového systému pro měření přeskokového napětí kapalných dielektrik jsou zobrazeny na obr. 6.1.8. Elektrody elektrodového systému musí být bez vady materiálu, hladké, čisté a vyrábějí se z bronzu, mosazi nebo austenitické korozivzdorné oceli. Pro experiment popsaný v této práci byly použity mosazné elektrody. Příklady elektrod se nesmějí naklánět, posouvat a ovlivňovat tvar aplikovaného elektrického pole. [22, 46]



Obr. 6.1.8 Vzhled a rozměry elektrodového systému pro měření přeskovového napětí kapalných dielektrik [22, 46]

## 6.2 Analyzátor olejů a pevných dielektrik

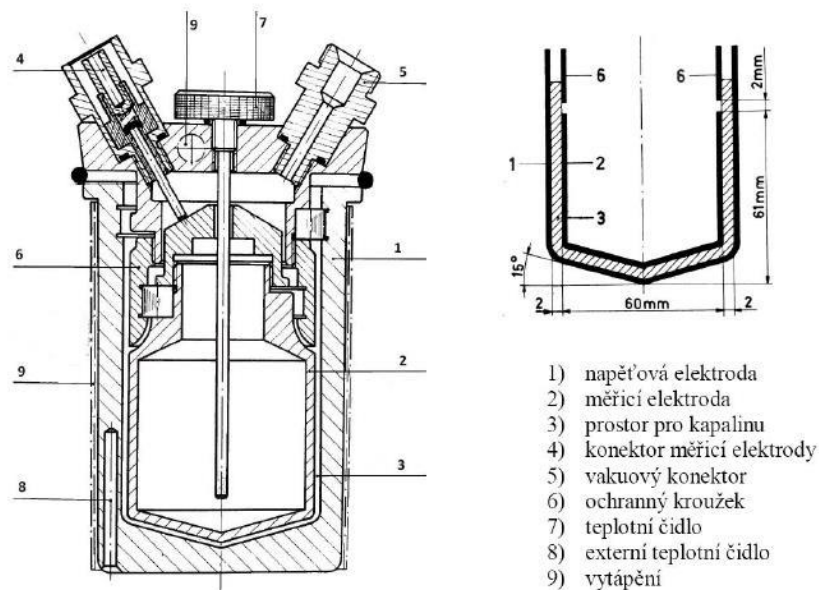
K vyhodnocení teplotní závislosti polarizačního indexu, rezistivity, reálné části komplexní permitivity a ztrátového činitele měřených vzorků byl použit analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831 firmy TETTEX A. G. ZURICH (obr. 6.2.1) spojený s elektrodovým systémem pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 (obr. 6.2.2 a 6.2.3) stejné společnosti. Zapojení přístrojů Tettex 2830/2831 a Tettex 2903 během měření je zobrazeno na obr. 6.2.4.



Obr. 6.2.1 Analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831 [67]



Obr. 6.2.2 Komora pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 [67]



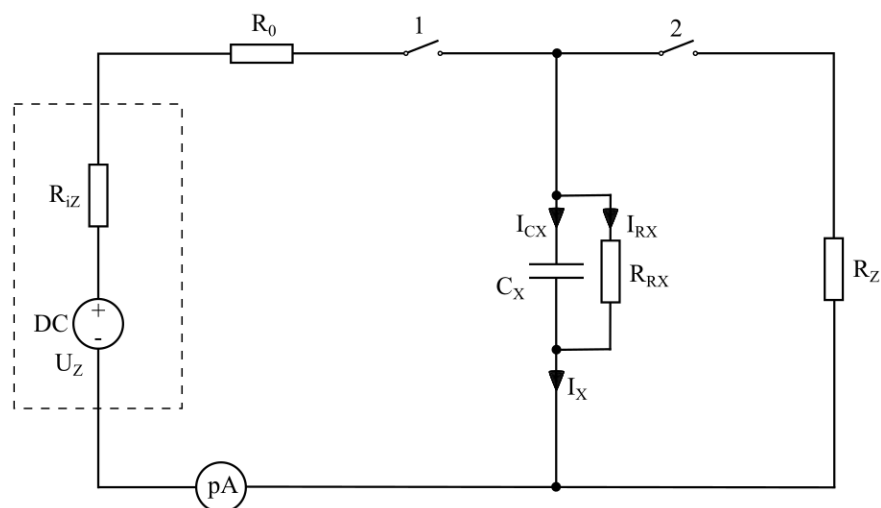
Obr. 6.2.3 Vnitřní schéma a rozměry elektrodového systému pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 [67]



Obr. 6.2.4 Zapojení přístrojů Tettex 2830/2831 a Tettex 2903 během měření

### 6.2.1 Dielektrická absorpce

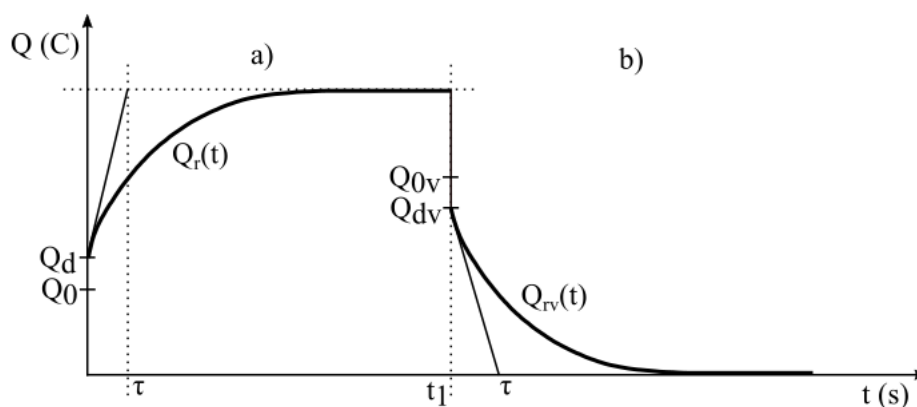
Polarizační index s rezistivitou se zjišťují z průběhu dielektrické absorpce. Dielektrická absorpce je složitý, časově závislý děj, který je možné sledovat jako nábojovou a proudovou odezvu kondenzátoru s reálným dielektrikem, jestliže je tento kondenzátor připojen ke zdroji stejnosměrného napětí. Zmíněný kondenzátor se nenabije okamžitě po připojení zdroje, ale nabije se s určitou časovou prodlevou. Se zpožděním probíhá také vybíjení kondenzátoru. Základní příčinou této časové prodlevy jsou relaxační polarizace, protože jsou pomalé a mají tak za následek určité zpoždění odezvy dielektrika. Zapojení obvodu během měření dielektrické absorpce je zobrazeno na obr. 6.2.5.  $U_Z$  (V) je napětí stejnosměrného vysokonapěťového zdroje (DC),  $R_{iZ}$  ( $\Omega$ ) vyjadřuje vnitřní odpor zdroje,  $R_0$  ( $\Omega$ ) značí odpor přívodů mezi zdrojem a elektrodovým systémem a  $R_Z$  ( $\Omega$ ) je zátěž. ( $C_X$ ) je elektrodový systém Tettex 2903 s měřeným vzorkem, ( $R_{RX}$ ) vyjadřuje ztráty elektrodového systému s měřeným vzorkem ( $C_X$ ),  $I_{CX}$  (A) je proud protékající elektrodovým systémem ( $C_X$ ),  $I_{RX}$  (A) je proud protékající ztrátovým odporem  $R_{RX}$  ( $\Omega$ ) a (pA) je pikoampermetr. Stejnosměrný vysokonapěťový zdroj (DC) je zabudovaný v jednotce 2831. Hodnoty použitého napětí a měřeného proudu (absorpčního proudu) jsou v jednotce 2830 digitalizovány a tyto data jsou následně zpracována pomocí vestavěného počítače. Zdroj stejnosměrného napětí musí být dostatečně stabilní a doporučená úroveň napětí je 500, 1000, 2 500, 5 000, 10 000 a 15 000 (V). [22, 46, 68, 69] V této práci byla použita úroveň napětí 500 (V).



Obr. 6.2.5 Zapojení obvodu během měření dielektrické absorpce [67]

### Elektrický náboj během dielektrické absorpce

Nabíjení elektrického náboje na elektrody kondenzátoru s reálným dielektrikem (obr. 6.2.6 a) lze sledovat ve čtyřech fázích. V první fázi po připojení stejnosměrného zdroje (po sepnutí spínače 1 na obr. 6.2.5) dochází na elektrodách kondenzátoru k téměř okamžitému nárůstu náboje  $Q_0$  (C). Kondenzátor začne vykazovat tzv. geometrickou kapacitu  $C_0$  (F), která odpovídá kapacitě kondenzátoru s vakuem jako dielektrikem. V druhé fázi vzniká na elektrodách kondenzátoru nárůst náboje o náboj  $Q_d$  (C). Tento nárůst proběhne se zpožděním v rozmezí  $10^{-16}$  až  $10^{-12}$  sekund, které odpovídá deformačním polarizacím. Ve třetí fázi se objevuje na elektrodách kondenzátoru relativně pomalý exponenciální růst náboje  $Q_r(t)$  (C). Ten se asymptoticky blíží k určité maximální velikosti náboje, který je daný kondenzátor schopný jímat. Příčinou časové prodlevy jsou relaxační polarizace. V čase  $t_1$  (s) se rozpojí spínač 1 a sepne spínač 2 (obr. 6.2.5). Dojde k procesu vybíjení kondenzátoru, který je inverzní k procesu nabíjení. Při vybíjení kondenzátoru s reálným dielektrikem (obr. 6.2.6 b) probíhá výše popsáný děj obráceně a vybíjecí náboj  $Q_{rv}(t)$  (C) exponenciálně klesá a asymptoticky se blíží k nule. Platí rovnosti nábojů při nabíjení a vybíjení:  $Q_0=Q_{0v}$ ,  $Q_d=Q_{dv}$  a  $Q_r(t)=Q_{rv}(t)$ .  $\tau$  (s) je časová konstanta známá jako relaxační doba. [22, 68, 69]



Obr. 6.2.6 Změna náboje na elektrodách kondenzátoru s reálným dielektrikem v závislosti na čase během a) nabíjení, b) vybíjení [22]

### Elektrický proud během dielektrické absorpce

Časová závislost proudů, které protékají reálným dielektrikem kondenzátoru během nabíjení a vybíjení, je zobrazena na obr. 6.2.7. Elektrický proud lze obecně vypočítat z příslušného elektrického náboje podle vztahu:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (6.2.1)$$

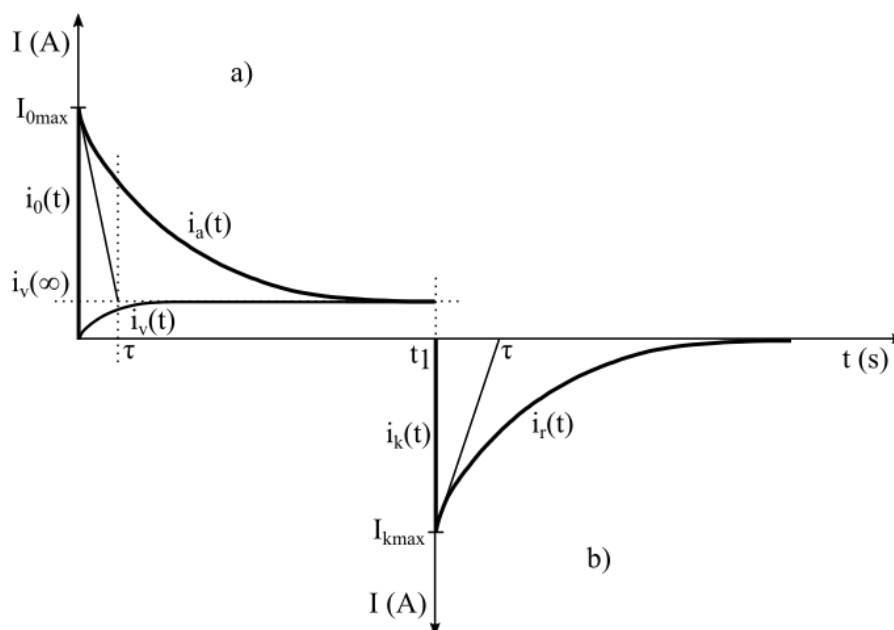
kde  $t$  (s) označuje čas. Při sepnutí spínače 1 (obr. 6.2.5) dojde k připojení stejnosměrného zdroje a začne proces nabíjení kondenzátoru (obr. 6.2.7 a). Obvodem začne nejprve procházet nabíjecí proud  $i_0$  (A), který odpovídá nabíjení geometrické kapacity kondenzátoru  $C_0$  (F) a deformačním polarizacím. Nabíjecí proud vzroste téměř okamžitě na svou maximální hodnotu  $I_{0\max}$  (A), kterou lze (podle obr. 6.2.5) vypočítat podle vztahu:

$$I_{0\max} = \frac{U_z}{R_{iz} + R_0}. \quad (6.2.2)$$

Z této maximální hodnoty začne tzv. absorpční proud  $i_a$  (A), který odpovídá relaxačním polarizacím, exponenciálně klesat a asymptoticky se blíží k ustálené hodnotě vodivostního proudu  $i_{v(\infty)}$  (A). Dobíjecí proud se vypočítá podle vztahu:

$$i_d = i_a + i_{v(\infty)}. \quad (6.2.3)$$

Složení a stav dielektrika velmi ovlivňují strmost klesajícího absorpčního proudu. Naměřením absorpčního proudu je tedy možné zjistit aktuální stav měřeného dielektrika. Vodivostní proud  $i_v$  (A) je způsoben pohybem volných nosičů elektrického náboje, které se v dielektriku pohybují. Vodivostní proud je přímo úměrný vlhkosti dielektrika. Elektrická vodivost je velice vysoká a vodivostní proud velmi vzroste na úkor proudu absorpčního, např. u velmi zvlhlé izolace. V čase  $t_1$  (s) se rozpojí spínač 1 a sepne spínač 2 (obr. 6.2.5). Dojde k procesu vybíjení kondenzátoru, který je inverzní k procesu nabíjení. Při vybíjení kondenzátoru s reálným dielektrikem (obr. 6.2.7 b) probíhá výše popsany děj obráceně a resorpční proud  $i_r$  (A) exponenciálně klesá a asymptoticky se blíží k nule. Ačkoliv platí rovnost nábojů  $Q_r = Q_{rv}$ , resorpční proud není roven proudu absorpčnímu. Část náboje se vyrovnala uvnitř dielektrika svodovými cestami.  $i_k$  (A) je vybíjecí proud a  $I_{k\max}$  (A) představuje jeho maximální hodnotu.  $\tau$  (s) je časová konstanta známá jako relaxační doba. [22, 68, 69]



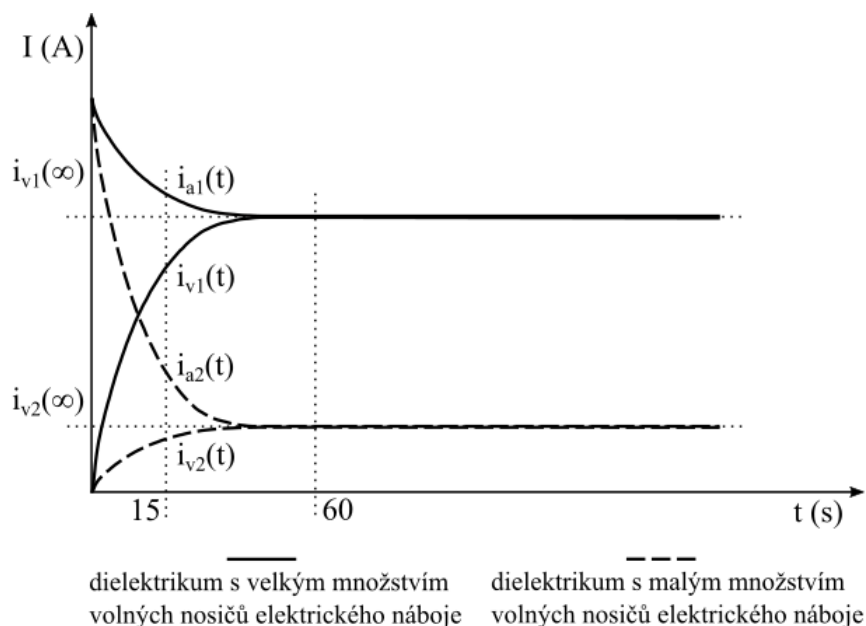
Obr. 6.2.7 Změna proudu tekoucího reálným dielektrikem v závislosti na čase během a) nabíjení, b) vybíjení [22, 48]

### Polarizační index

Pro zjištění aktuálního stavu dielektrika se v praxi běžně používá časová závislost absorpčního proudu (obr. 6.2.8). Poměr absorpčních proudů v určitých časových okamžicích se nazývá polarizační index  $p_i$  (-). Využívá se polarizační index minutový a desetiminutový. Desetiminutový polarizační index  $p_{i10}$  (-) slouží především v diagnostice izolačních systémů elektrických strojů. Pro potřeby této práce se mnohem více hodí použití minutového polarizačního indexu  $p_{i1}$  (-), který se vypočítá podle vztahu:

$$p_{i1} = \frac{i_{a(15)}}{i_{a(60)}}, \quad (6.2.4)$$

kde  $i_{a(15)}$  (A) představuje absorpční proud dielektrika v patnácté vteřině od jeho připojení ke zdroji stejnosměrného napětí,  $i_{a(60)}$  (A) značí absorpční proud dielektrika v šedesáté vteřině od jeho připojení ke zdroji stejnosměrného napětí. Dobré izolační materiály mají nízký vodivostní proud a jejich dominující absorpční proud výrazně navýší i polarizační index, např. 2,5-5. U porušeného, znečištěného a především navlhlého dielektrika se polarizační index blíží k jedné. [22, 46, 70]



Obr. 6.2.8 Časová závislost absorpčního proudu dielektrika [22]

### Rezistivita

Měření stejnosměrné rezistivity  $\rho$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) je založené na pikoampérmetru (obr. 6.2.5), který měří proud procházející přes elektrodový systém Tettex 2903. Stejnosměrná rezistivita je odpor měřeného materiálu přepočítaný na rozměry použitého elektrodového systému. Nízké hodnoty rezistivity vyjadřují, že materiál snadno přenáší volné elektrické náboje. Stejnosměrná rezistivita je velmi závislá na teplotě a jejích změnách, proto je nutné měření uskutečnit za přesně stanovené teploty. Dále je stejnosměrná rezistivita ovlivněna velikostí použitého stejnosměrného napětí. Pro porovnání výsledků je velmi důležité, aby každé měření probíhalo se stejným elektrickým namáháním a také polaritou. Stejnosměrná rezistivita tekutých izolantů se vypočítá podle vztahu:

$$\rho = K \cdot \frac{U_Z}{i_{a(\infty)}}, \quad (6.2.5)$$

kde  $i_{a(\infty)}$  (A) je ustálená hodnota absorpčního proudu, která je rovnocenná ustálené hodnotě vodivostního proudu  $i_{v(\infty)}$  (A) a  $U_Z$  (V) je napětí stejnosměrného vysokonapěťového zdroje. Dále  $K$  (m) je konstanta elektrodového systému Tettex 2903, kterou lze spočítat podle vztahu:

$$K = \frac{C_{vzd}}{\epsilon_0}, \quad (6.2.6)$$

nebo



$$K = 10^{12} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot C_{\text{vzd}}(\text{pF}) = 0,0113 \cdot C_{\text{vzd}}(\text{pF}), \quad (6.2.7)$$

kde  $C_{\text{vzd}}$  je kapacita vzduchu, která pro elektrodotový systém Tettex 2903 je cca 60 (pF)  $\pm 20$  (%) a vypočítá se podle vztahu:

$$C_{\text{vzd}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}, \quad (6.2.8)$$

kde  $\varepsilon_r$  (-) je relativní permitivita vzduchu a rovná se jedné.  $S$  ( $\text{m}^2$ ) je plocha měřících elektrod, která pro elektrodotový systém Tettex 2903 je cca 0,0134 ( $\text{m}^2$ ) a  $d$  (m) je vzdálenost mezi elektrodami, která pro elektrodotový systém Tettex 2903 je cca 0,002 (m). Po dosazení rovnice (6.2.8) do rovnice (6.2.6) vyjde vztah:

$$K = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{\varepsilon_0 \cdot d}, \quad (6.2.9)$$

kde po úpravách vyjde vztah:

$$K = \frac{\varepsilon_r \cdot S}{d}. \quad (6.2.10)$$

Po dosazení rovnice (6.2.10) do rovnice (6.2.5) vyjde vztah:

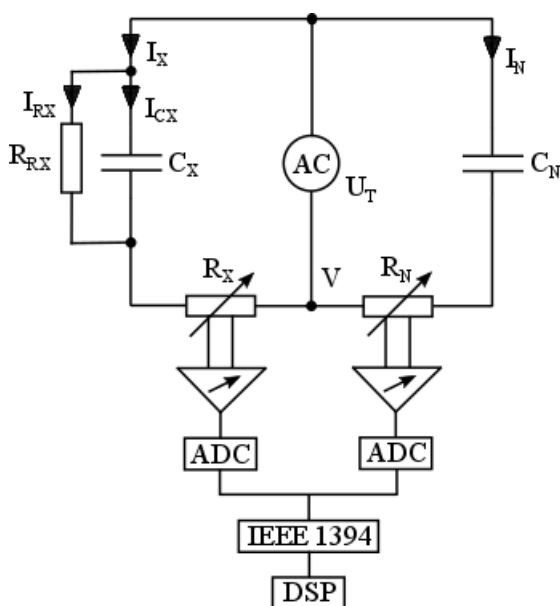
$$\rho = \frac{\varepsilon_r \cdot S}{d} \cdot \frac{U_Z}{i_{a(\infty)}}. [47, 67] \quad (6.2.11)$$

## 6.2.2 Reálná složka komplexní permitivity a ztrátový činitel

Hodnota reálné složky komplexní permitivity a ztrátového činitele se často určuje pomocí tzv. můstkových metod. Přímým měřením lze často získat pouze hodnoty vyvážených kapacitních a odporových dekád v příslušných větvích můstku, které však nejsou hledanými veličinami. Požadované veličiny měřeného vzorku je nutno dopočítat pomocí vhodných vzorečků. Můstkové metody se používají v oblasti průmyslové a jí blízkých frekvencí. Nejpoužívanější můstky jsou ty, které vycházejí z principu zapojení Scheringova můstku a patří mezi ně např. Scheringův vysokonapěťový, čtyřkapacitní nebo automatický můstek. Mezi další používané můstky patří např. paralelní T-můstek nebo můstek transformátorový. [22, 46]

V této práci bylo měření založeno na metodě dvojitého vektrometru (obr. 6.2.9) pomocí měřicího systému 2830. V této metodě je měřen referenční proud  $I_N$  (A), který protéká referenčním kondenzátorem ( $C_N$ ) a proud  $I_{CX}$  (A), který protéká elektrodotovým systémem Tettex 2903 s měřeným vzorkem ( $C_X$ ). ( $R_{RX}$ ) vyjadřuje ztráty elektrodotového

systému s měřeným vzorkem ( $C_X$ ) a  $I_{RX}$  (A) je proud protékající ztrátovým odporem  $R_{RX}$  ( $\Omega$ ).  $V$  je referenční bod měření. Obě větve jsou napájené vysokonapěťovým střídavým zdrojem (AC). Oba proudy  $I_N$  (A) a  $I_X$  (A) jsou měřeny nastavitelnými bočníky ( $R_X$ ) a ( $R_N$ ) a následně digitalizovány pomocí analogovo/digitálního převodníku (ADC). Pomocí datové sběrnice IEEE 1394 jsou všechna digitální data označena časově. Pomocí této metody je možné rychle a přesně měřit nejen hodnoty měřené veličiny, ale rovněž lze také získat fázový posun mezi  $I_N$  (A) a  $I_X$  (A). (DSP) je zkratka pro Digital Signal Processing a vyjadřuje zpracování digitálních dat pomocí vestavěného počítače. [67]



Obr. 6.2.9 Zapojení obvodu během měření reálné složky komplexní permitivity a ztrátového činitele [67]

## 7 Výběr vhodné nanopřísady a množství

Pro účely výběru vhodné nanopřísady byla použita metoda přeskokového napětí jako nejprokazatelnějšího parametru. Měření bylo provedeno s četností pět. Tato četnost měření je pro účely práce dostatečná a stejná četnost měření byla použita i pro vyhodnocení ostatních měřených elektrických parametrů, které jsou uvedeny v kapitole 8. V tab. 7.1 je přehledně uveden seznam devíti použitých nanopřísad a jejich základních vlastností.

Tab. 7.1 Seznam použitých nanopřísad

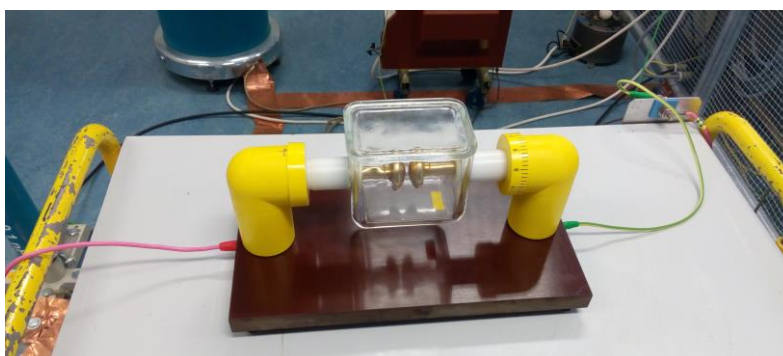
písmeno	typ nanopřísady	zkratka	čistota (%)	velikost nanopřísad (nm)	provedení	povrchová úprava
A	oxid zinečnatý	ZnO	99+	30	-	-
B	oxid zinečnatý	ZnO	99+	20	-	-
C	oxid zinečnatý	ZnO	≥98 ZnO ≤2 (3-aminopropyl) triethoxysilan	30	hydrofilní, lipofilní	(3-aminopropyl) triethoxysilan
D	oxid křemičitý	SiO <sub>2</sub>	99+	20	hydrofilní	-
E	oxid křemičitý	SiO <sub>2</sub>	≥98 SiO <sub>2</sub> ≤2 (3-aminopropyl) triethoxysilan	20	hydrofilní, lipofilní	(3-aminopropyl) triethoxysilan
F	oxid hlinitý (gama)	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,99	10	-	-
G	oxid hlinitý (gama)	γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,97	20-30	-	-
H	oxid titaničitý (anatas/rutil)	TiO <sub>2</sub>	99+	20	-	-
I	oxid titaničitý (anatas/rutil)	TiO <sub>2</sub>	>96 TiO <sub>2</sub> , <4 SiO <sub>2</sub>	20	hydrofilní, UV vzdorující	SiO <sub>2</sub>

## 7.1 Postup měření

Pro měření přeskokového napětí byly využity vzorky jednotlivých fluidních systémů s nanopřísadami, vyrobené podle kapitoly 5. Vzorky o objemu 400 (ml) byly umístěny do elektrodového systému pro měření přeskokového napětí kapalných dielektrik (obr. 6.1.3 a 6.1.8). Množství oleje bylo stanoveno objemem nádoby pro měření přeskokového napětí – 400 (ml). Tento elektrodový systém byl umístěn do vysokonapěťového prostoru zkušebny (obr. 7.1.1) a připojený na ovládací modul SM 4 a výkonový modul LM 30.

Zkouška přeskokového napětí fluidních systémů proběhla tak, že se vyhodnocovaný vzorek nalil do zkušební nádoby (obr. 6.1.3), která se naplnila takovým způsobem, aby vzorek stékal po stěně nádoby bez vytváření vzduchových bublinek. Pokud vzduchové bublinky přesto vznikly, bylo možné je odstranit pomocí čisté skleněné tyčinky, s kterou se zkoušený fluidní systém důkladně promíchal. Vzorek se podrobil šesti přeskokům za sebou v pětiminutových intervalech, po kterých byl vzorek vždy promícháván. Přeskokové napětí fluidních systémů bylo v této práci vyhodnoceno ve střídavém elektrickém poli při frekvenci 50 (Hz) a teplotně 25 (°C). Jestliže byl variační koeficient naměřených hodnot vyšší než 20 (%), bylo nutné zkoušku zopakovat s jiným vzorkem téže várky. Pokud byl i v tomto dalším pokusu variační koeficient vyšší než 20 (%), fluidních systém zkoušce nevyhověl. [22, 46]

Po skončení měření byl elektrodový systém zbaven použitého fluidního systému a byl umyt vodou a jarem. Poté byl vyčištěn cyklohexanem a umístěn do ultrazvukové vany přístroje VGT-1990QT po dobu jedné hodiny. Následně byl opět vyčištěn cyklohexanem a pro uschnutí byl umístěn do sušky Venticell po dobu dvou hodin při teplotě 70 (°C).

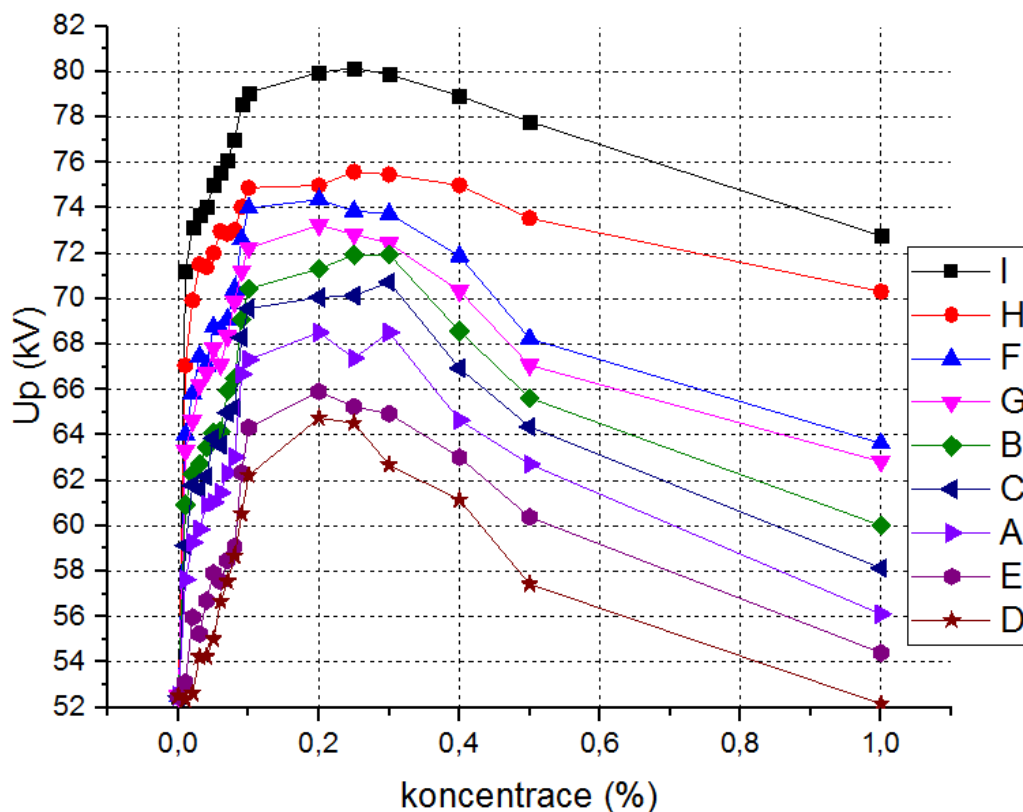


*Obr. 7.1.1 Elektrodový systém pro měření přeskokového napětí kapalných dielektrik umístěný do klece vysokonapěťové zkušebny*

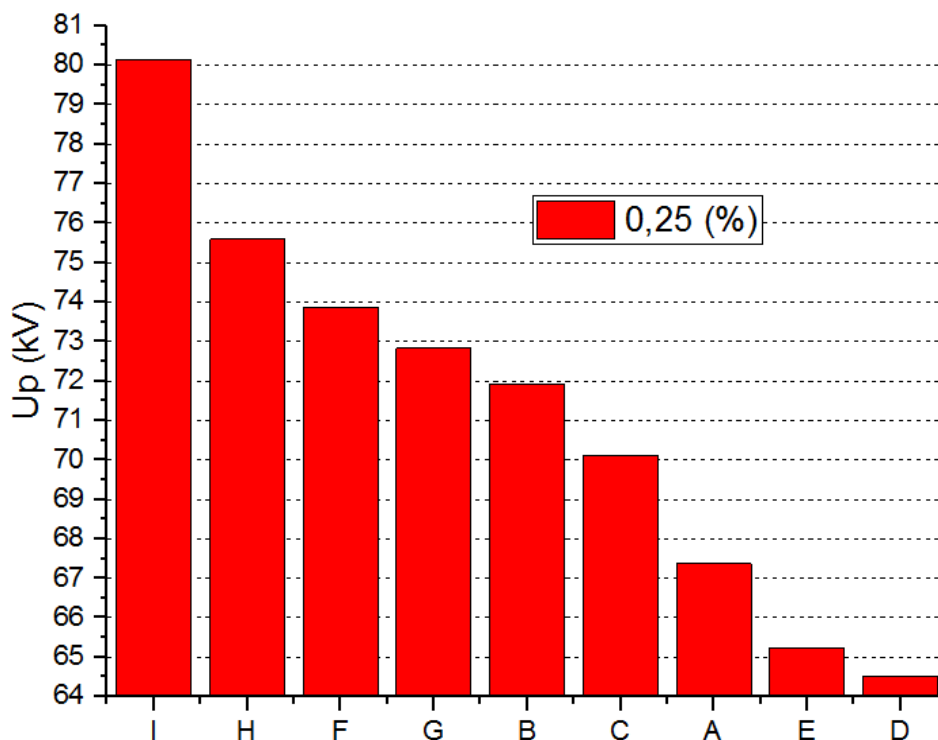
## 7.2 Získané výsledky a jejich vyhodnocení

Na obr. 7.2.1 je zobrazena závislost přeskokového napětí hodnocených fluidních systémů na koncentraci nanopřísad při teplotě 25 (°C). Podle (tab. 7.1) je zřejmé, že nejvyšší

přeskokové napětí mají fluidní systémy s typem nanopřířady  $\text{TiO}_2$ , následují  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$  a  $\text{SiO}_2$ . Přeskokové napětí a velikost nanočástic jsou v nepřímé úměře. Je to způsobeno tím, že určité množství nanopřířad se připojí na povrch vzduchových bublin obsažených v oleji a vytvoří na nich tenkou vrstvu [3]. Čím jsou tyto nanopřířady menší, tím se vrstva vytvoří lépe. Tato vrstva hraje důležitou roli v posilování stability vzduchových bublin a potlačuje vývoj bublin nových, což vede k zvýšení přeskokového napětí. Vyšších hodnot přeskokového napětí dále dosahují nanopřířady s hydrofilním provedením, protože takto upravený povrch nanopřířad mnohem lépe váže vodu dispergovanou v oleji [1]. Podle obr. 7.2.1 bylo zjištěno, že nejvyšší přeskokové napětí dosahuje nanopřířada I při koncentraci 0,25 (%), proto je na obr. 7.2.2 zobrazen sloupcový diagram přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřířad 0,25 (%) při teplotě 25 (°C), která toto tvrzení potvrzuje. Nad koncentrací 0,25 (%) se přeskokové napětí fluidního systému s nanopřířadou I začíná opět snižovat.



Obr. 7.2.1 Závislost přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů na koncentraci nanopřířad při teplotě 25 (°C)

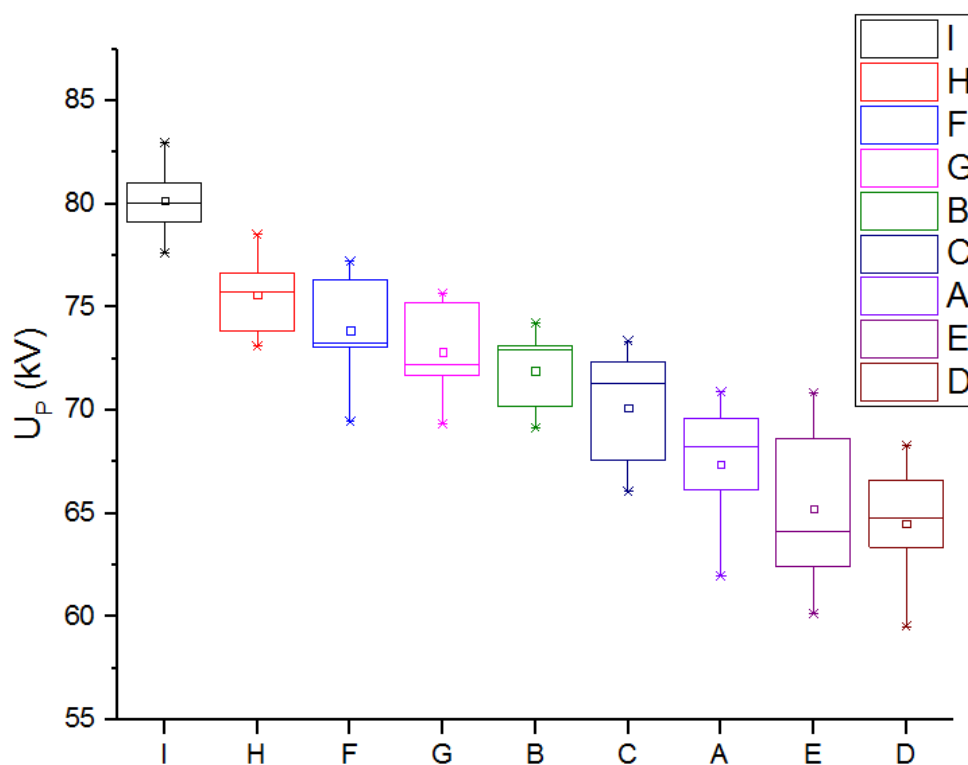


Obr. 7.2.2 Sloupcový diagram přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%) při teplotě 25 (°C)

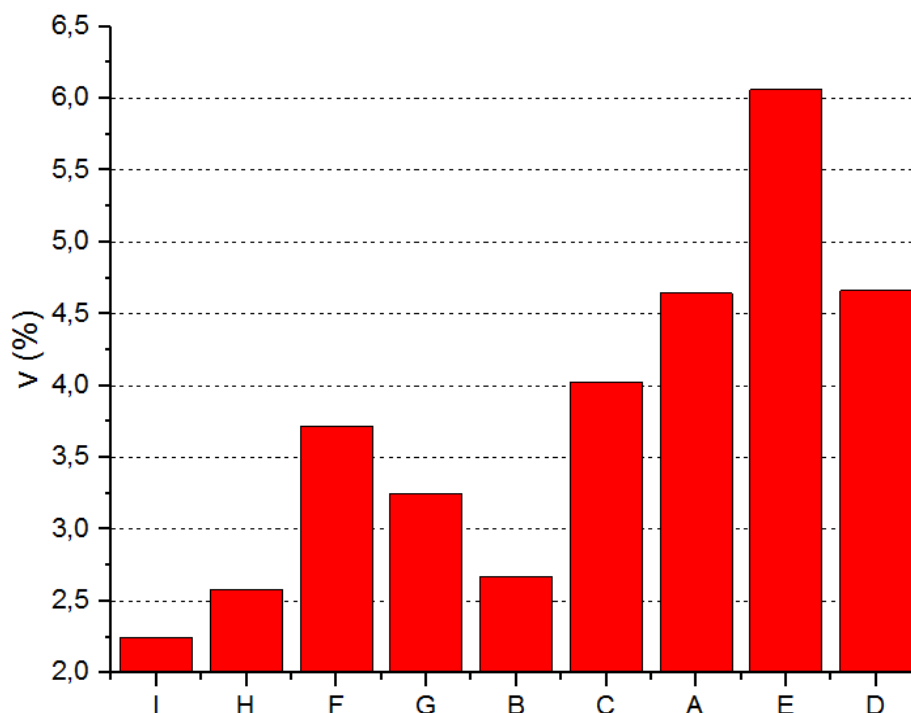
V tab. 7.2.1 jsou umístěny základní statistické veličiny přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%) při teplotě 25 (°C). Graficky jsou základní statistické veličiny zobrazeny na obr. 7.2.3 a 7.2.4. Obr. 7.2.3 zachycuje závislost přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%) formou boxplotů při teplotě 25 (°C) a obr. 7.2.4 zobrazuje sloupcový diagram variačního koeficientu vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%). Z tab. 7.2.1 i obr. 7.2.3 a 7.2.4 vychází jasně najevo, že nejen z hlediska velikosti přeskokového napětí, ale i s ohledem na základní statistické veličiny je nejlepší fluidní systém s nanopřísadou I.

Tab. 7.2.1 Základní statistické veličiny přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%) při teplotě 25 (°C)

	I	H	F	G	B	C	A	E	D
Max (kV) – maximum	82,96	78,52	77,21	75,69	74,23	73,35	70,88	70,86	68,31
Min (kV) – minimum	77,61	73,11	69,46	69,33	69,15	66,06	61,96	60,16	59,52
R (kV) – rozpětí	5,35	5,41	7,75	6,36	5,08	7,29	8,92	10,70	8,79
Me (kV) – medián	80,03	75,76	73,24	72,23	72,92	71,32	68,24	64,12	64,79
X <sub>0,25</sub> (kV) – dolní kvartil	79,12	73,83	73,03	71,66	70,18	67,56	66,15	62,42	63,36
X <sub>0,75</sub> (kV) – horní kvartil	81,03	76,68	76,31	75,24	73,12	72,31	69,62	68,64	66,62
μ (kV) – střední hodnota	80,15	75,58	73,85	72,83	71,92	70,12	67,37	65,24	64,52
σ (kV) – směrodatná od.	1,80	1,95	2,74	2,37	1,92	2,82	3,13	3,95	3,01
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> ) – rozptyl	3,24	3,81	7,53	5,59	3,70	7,94	9,78	15,63	9,04
v (%) – variační koef.	2,25	2,58	3,72	3,25	2,67	4,02	4,64	6,06	4,66



Obr. 7.2.3 Závislost přeskokového napětí vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%) formou boxplotů při teplotě 25 (°C)



Obr. 7.2.4 Sloupcový diagram variačního koeficientu vyhodnocovaných fluidních systémů s obsahem nanopřísad 0,25 (%)

## 8 Výzkum rozhodujících elektrických parametrů

Tato kapitola se zabývá polarizačním indexem, rezistivitou, reálnou složkou komplexní permitivity a ztrátovým činitelem vyrobených fluidních systémů s nanopřísadami. Základní statistické parametry všech těchto veličin jsou uvedeny v příloze.

### 8.1 Dielektrická absorpce

Z dielektrické absorpce vychází polarizační index a rezistivita měřených fluidních systémů.

#### 8.1.1 Polarizační index

##### Postup měření

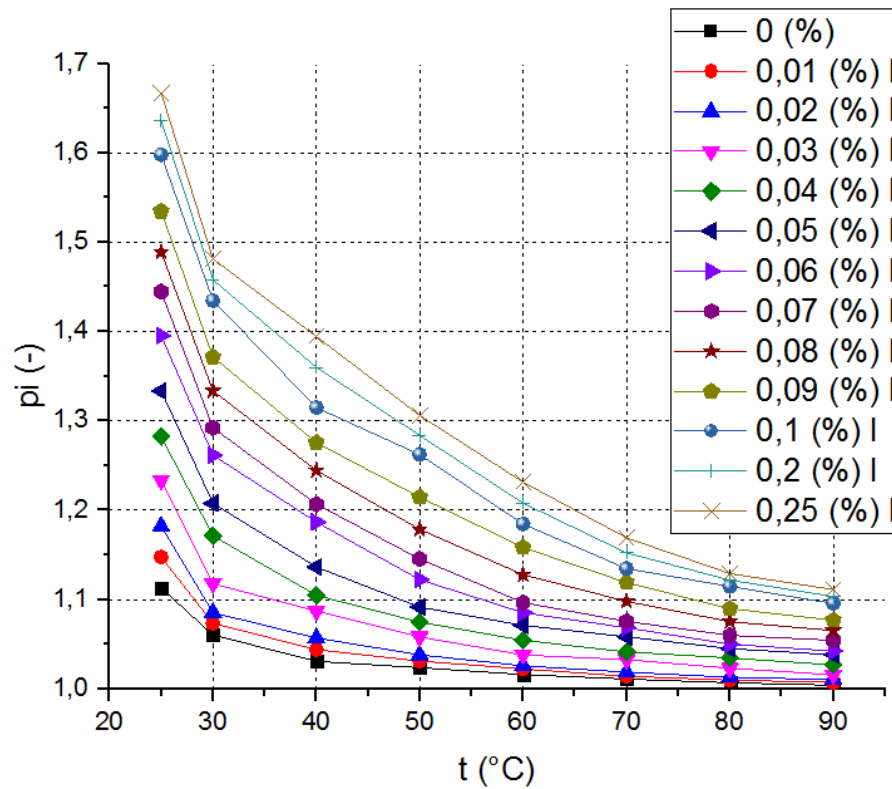
Pro měření polarizačního indexu byly použity vzorky fluidních systémů s nanopřísadami typu I, vyrobené podle kapitoly 5. Vzorky o objemu 40 (ml) byly pomocí injekční stříkačky umístěny do elektrodového systému pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903. Množství oleje bylo stanoveno objemem prostoru měřicího kondenzátoru pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 – 40 (ml). Elektrodový systém pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 byl připojen na analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831. Po skončení měření byl prostor měřicího kondenzátoru zbaven použitého fluidního systému, rozebrán a



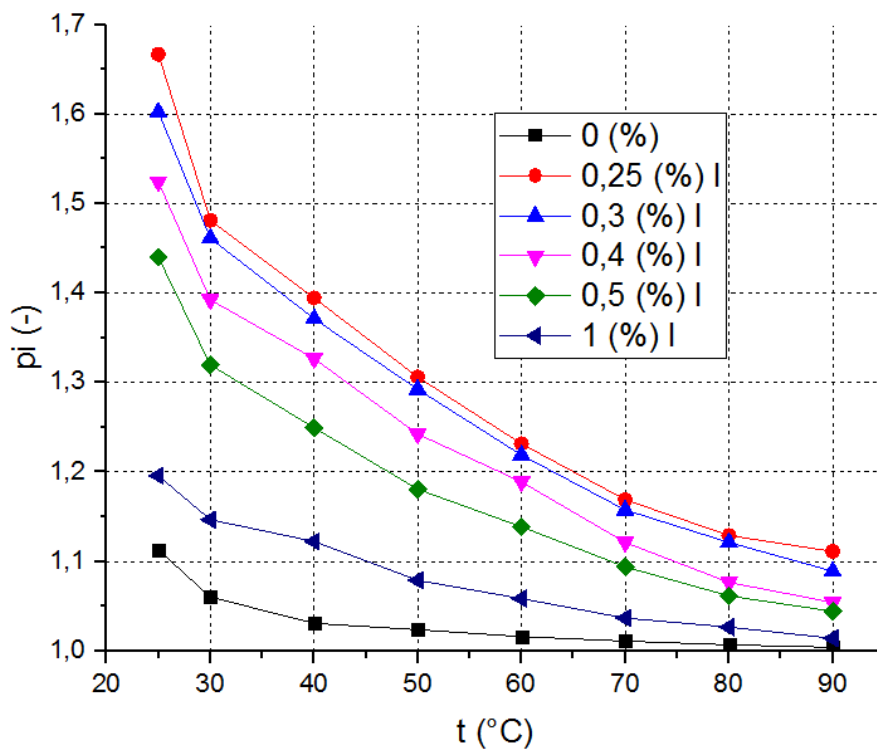
očištěn vodou a jarem. Poté byly jeho jednotlivé části vyčištěny cyklohexanem a umístěny do ultrazvukové vany přístroje VGT-1990QT po dobu jedné hodiny. Následně byl opět vyčištěn cyklohexanem a pro uschnutí byl umístěn do sušky Venticell po dobu dvou hodin při teplotě 70 (°C). Základní statistické parametry polarizačního indexu všech vyhodnocovaných fluidních systémů jsou uvedeny v příloze (tab. 1 – tab. 17). K vyhodnocení požadovaného polarizačního indexu byl použit aritmetický průměr z naměřených hodnot. Tloušťka všech vyhodnocovaných vzorků byla při každém měření vždy stejná, protože byla definována vzdáleností 0,002 (m) mezi měřicí a napěťovou elektrodou elektrodového systému Tettex 2903.

### **Získané výsledky a jejich vyhodnocení**

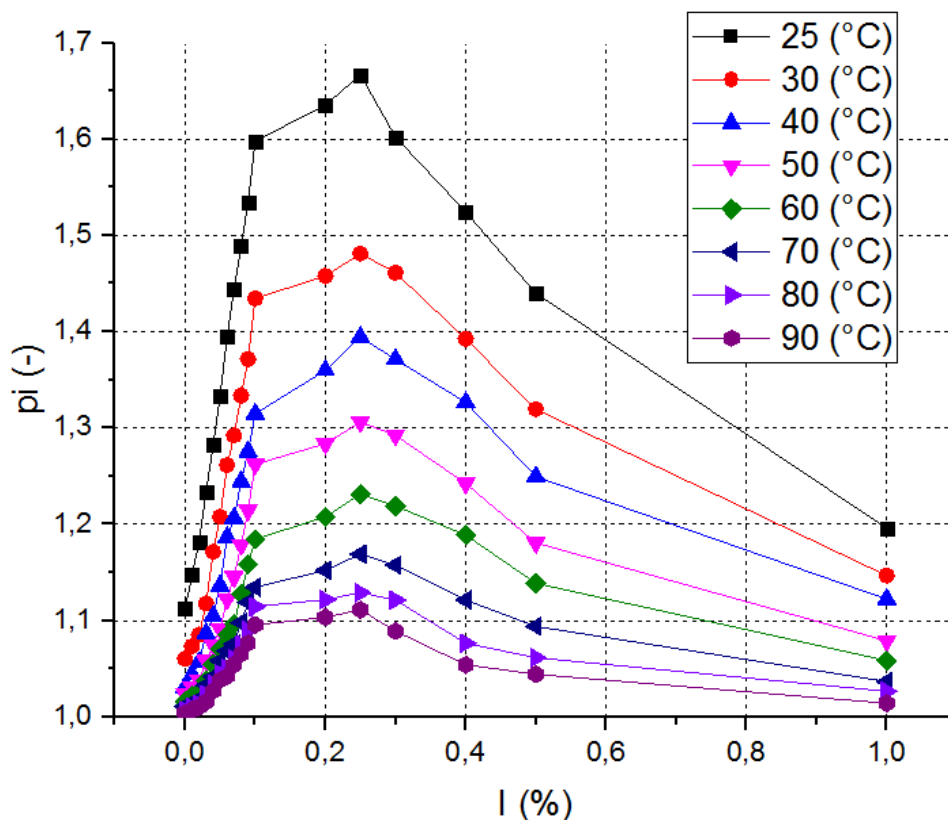
Obr. 8.1.1 představuje závislost polarizačního indexu fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0 (%) do 0,25 (%) na teplotě. Je zvolena teplotní závislost polarizačního indexu, protože velikost polarizačního indexu je na změnách teploty silně závislá. Hodnoty polarizačního indexu rostou s rostoucím množstvím nanopřísady I ve fluidním systému, až do hodnoty 0,25 (%). Na obr. 8.1.2 je vidět závislost polarizačního indexu fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0,25 (%) do 1 (%), včetně 0 (%), na teplotě. Hodnoty polarizačního indexu klesají od hodnoty 0,25 (%) a blíží se hodnotám polarizačního indexu fluidního systému bez nanopřísad. Pro obr. 8.1.1 a 8.1.2 platí, že s rostoucí teplotou polarizační index klesá, protože roste počet volných nosičů elektrického náboje ve fluidním systému. Tyto volné nosiče elektrického náboje, převážně ve formě iontů, jsou produkovány disociací pevných nečistot, které jsou ve fluidním systému přítomny [71, 72-74]. Disociaci pevných nečistot je možné zabránit pomocí inhibitorů, které vylepšují oxidační stabilitu oleje. Podle [75] jsou však inhibitory postupně spotřebovávány vlivem oxidačních reakcí v průběhu stárnutí oleje. Na obr. 8.1.3 je znázorněna závislost polarizačního indexu fluidního systému I na koncentraci nanopřísad pro teploty od 25 (°C) do 90 (°C). Výsledek vyšel podle očekávání, protože u všech měřených teplot polarizační index roste až do koncentrace 0,25 (%) a poté začíná klesat. Dále vychází jasně najevo, že s rostoucí teplotou polarizační index klesá, protože přibývají volné nosiče elektrického náboje.



Obr. 8.1.1 Závislost polarizačního indexu fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0 (%) do 0,25 (%) na teplotě



Obr. 8.1.2 Závislost polarizačního indexu fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0,25 (%) do 1 (%), včetně 0 (%), na teplotě



Obr. 8.1.3 Závislost polarizačního indexu fluidního systému  $I$  na koncentraci nanopřísad pro teploty od 25 (°C) do 90 (°C)

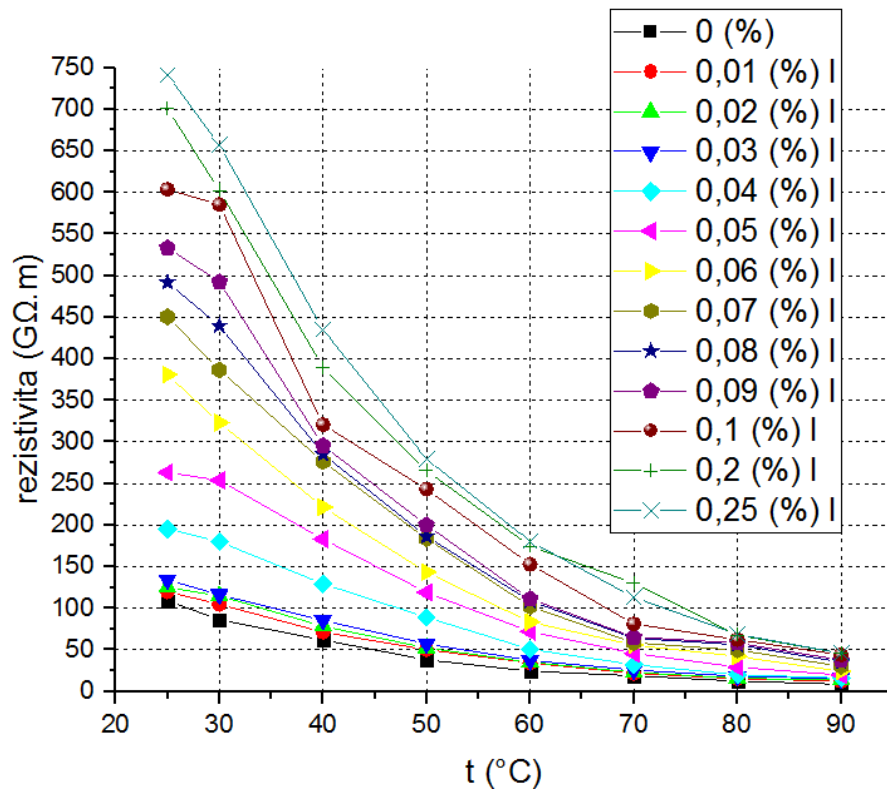
## 8.1.2 Rezistivita

### Postup měření

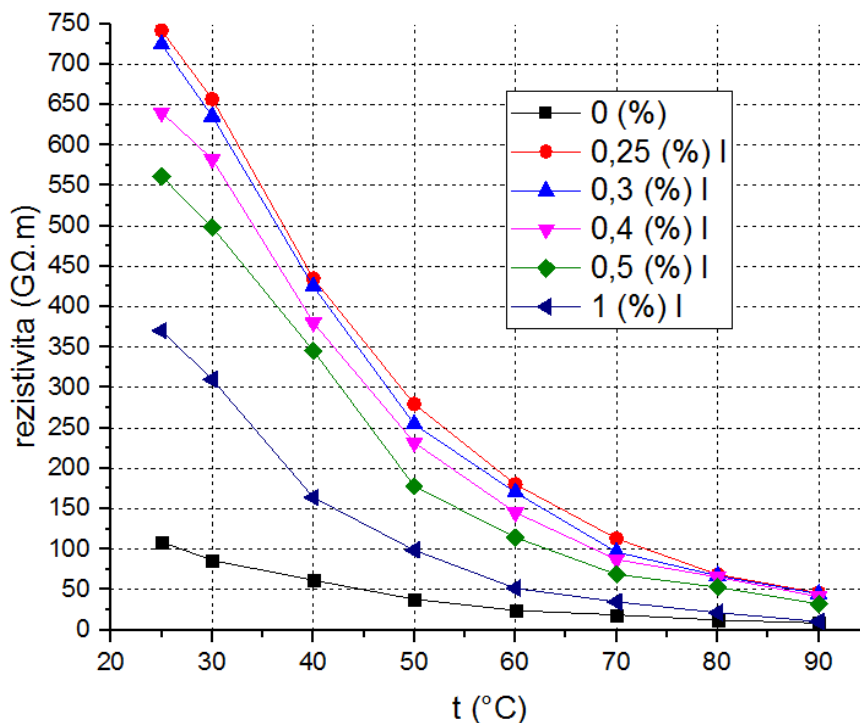
Pro měření rezistivity byly použity vzorky fluidních systémů s dispergovanými nanopřísadami typu I, vyrobené podle kapitoly 5. Stejně jako v kapitole 8.1.1 byly vzorky o objemu 40 (ml) pomocí injekční stříkačky umístěny do prostoru měřícího kondenzátoru pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903. Elektrodotový systém pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 byl připojen na analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831. Po skončení měření byl prostor měřícího kondenzátoru zbaven použitého fluidního systému, rozebrán a očištěn. Postup čištění je rozveden v kapitole 8.1.1. Základní statistické parametry rezistivity všech vyhodnocovaných fluidních systémů jsou uvedeny v příloze (tab. 18 – tab. 34). K vyhodnocení požadované rezistivity byl použit aritmetický průměr z naměřených hodnot. Tloušťka všech vyhodnocovaných vzorků byla při každém měření vždy stejná, protože byla definována vzdáleností 0,002 (m) mezi měřicí a napětíovou elektrodou elektrodotového systému Tettex 2903.

### Získané výsledky a jejich vyhodnocení

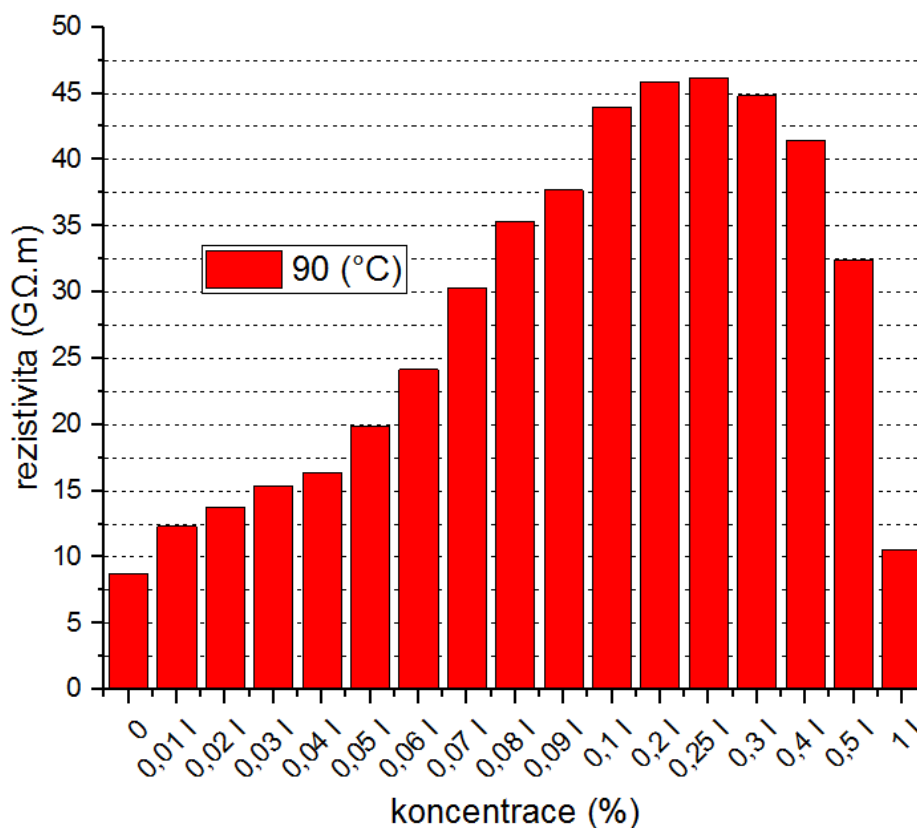
Obr. 8.1.4 představuje závislost rezistivity fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0 (%) do 0,25 (%) na teplotě. Je zvolena teplotní závislost rezistivity, protože velikost rezistivity je na změnách teploty silně závislá. Hodnoty rezistivity rostou s rostoucím množstvím nanopřísady I ve fluidním systému, až do hodnoty 0,25 (%). Na obr. 8.1.5 je vidět závislost rezistivity fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0,25 (%) do 1 (%), včetně 0 (%), na teplotě. Hodnoty rezistivity klesají od hodnoty 0,25 (%) a blíží se hodnotám rezistivity fluidního systému bez dispergovaných nanopřísad. Pro obr. 8.1.4 a 8.1.5 platí, že s rostoucí teplotou rezistivita klesá, protože roste počet volných nosičů elektrického náboje ve fluidním systému. Tyto volné nosiče elektrického náboje, převážně ve formě iontů, jsou produkovány disociací pevných nečistot, které jsou ve fluidním systému přítomny [71, 72-74]. Získané výsledky rezistivity měřených fluidních systémů mají stejný trend jako získané výsledky polarizačního indexu, protože oba měřené parametry vycházejí ze stejných absorpčních křivek. Disociaci pevných nečistot je možné zabránit pomocí inhibitorů, které vylepšují oxidační stabilitu oleje. Podle [75] jsou však inhibitory postupně spotřebovávány vlivem oxidačních reakcí v průběhu stárnutí oleje. Na obr. 8.1.6 je znázorněn sloupcový diagram závislosti rezistivity fluidního systému na koncentraci nanopřísady I při teplotě 90 (°C). Výsledek vyšel podle očekávání, protože u měřené teploty rezistivita roste až do koncentrace 0,25 (%) a poté začíná klesat.



Obr. 8.1.4 Závislost rezistivity fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0 (%) do 0,25 (%) na teplotě



Obr. 8.1.5 Závislost rezistivity fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0,25 (%) do 1 (%), včetně 0 (%), na teplotě



Obr. 8.1.6 Sloupcový diagram závislosti rezistivity fluidního systému na koncentraci nanopřířady I při teplotě 90 (°C)

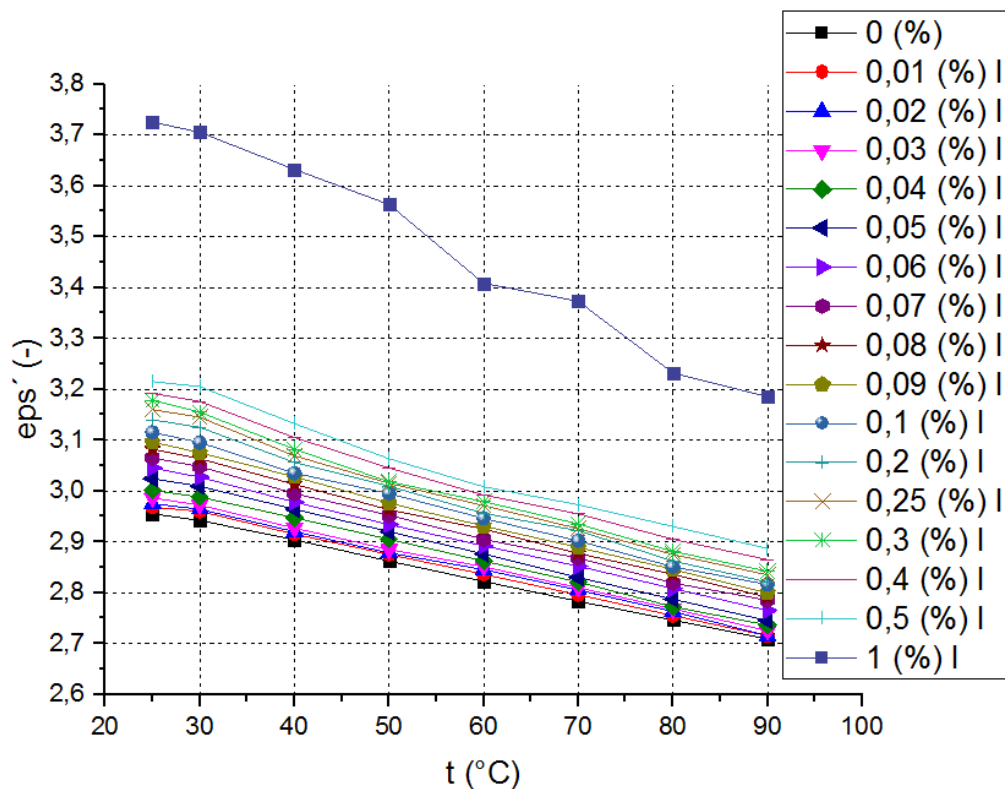
## 8.2 Reálná složka komplexní permitivity

### Postup měření

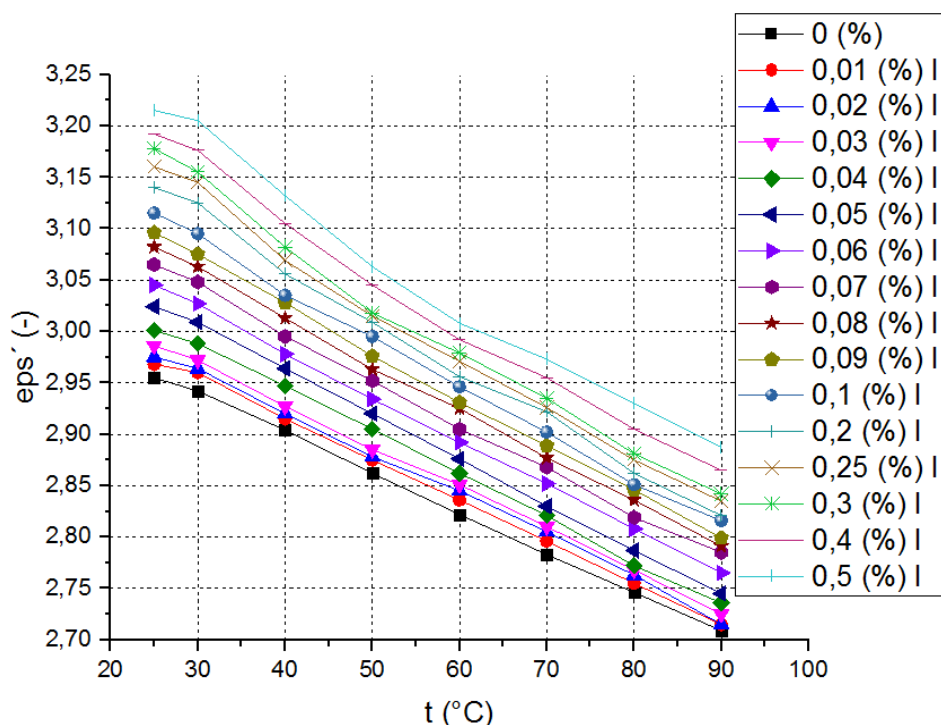
Pro měření reálné složky komplexní permitivity byly použity vzorky fluidních systémů s dispergovanými nanopřířadami typu I, vyrobené podle kapitoly 5. Stejně jako v kapitole 8.1.1 byly vzorky o objemu 40 (ml) pomocí injekční stříkačky umístěny do elektrodového systému pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903. Elektrodový systém pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 byl připojen na analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831. Po skončení měření byl prostor měřícího kondenzátoru zbaven použitého fluidního systému, rozebrán a očištěn. Postup čištění je rozveden v kapitole 8.1.1. Základní statistické parametry reálné složky komplexní permitivity všech vyhodnocovaných fluidních systémů jsou uvedeny v příloze (tab. 35 – tab. 51). K vyhodnocení požadované reálné složky komplexní permitivity byl použit aritmetický průměr z naměřených hodnot. Tloušťka všech vyhodnocovaných vzorků byla při každém měření vždy stejná, protože byla definována vzdáleností 0,002 (m) mezi měřicí a napět'ovou elektrodou elektrodového systému Tettex 2903.

### Získané výsledky a jejich vyhodnocení

Na obr. 8.1.7 je zobrazena závislost reálné složky komplexní permitivity fluidního systému s nanopřísadou I pro všechny měřené koncentrace na teplotě. Je zvolena teplotní závislost reálné složky komplexní permitivity, protože velikost reálné složky komplexní permitivity je na změnách teploty silně závislá. Se vzrůstající teplotou reálná složka komplexní permitivity klesá. Dipóly fluidního systému jsou totiž vystaveny nejen účinkům teploty prostředí a vnějšího střídavého elektrického pole, ale také jejich vlastnímu chaotickému tepelnému pohybu. Chaotický tepelný pohyb přímo souvisí s teplotou a při vzrůstající teplotě stále více překáží organizovanému natáčení dipólů fluidního systému podle směru vnějšího střídavého elektrického pole. S rostoucí koncentrací nanopřísady I ve fluidním systému dochází k růstu reálné složky komplexní permitivity. Je to způsobeno tím, že s růstem koncentrace nanopřísady I roste i celkový podíl migrační polarizace ve fluidním systému [66, 76]. Obr. 8.1.8 představuje závislost reálné složky komplexní permitivity fluidního systému s nanopřísadou I pro všechny měřené koncentrace bez 1 (%) na teplotě. Na obr. 8.1.7 a 8.1.8 nejsou patrné vrcholy žádných relaxačních procesů, protože se relaxační procesy (dipólová relaxační a Maxwell-Wagner-Sillars polarizace) začínají výrazněji projevat až v oblastech nižších teplot [77, 40].



Obr. 8.1.7 Závislost reálné složky komplexní permitivity fluidního systému s nanopřísadou I pro všechny měřené koncentrace na teplotě



Obr. 8.1.8 Závislost reálné složky komplexní permitivity fluidního systému s nanopřířadou I pro všechny měřené koncentrace bez 1 (%) na teplotě

### 8.3 Ztrátový činitel

#### Postup měření

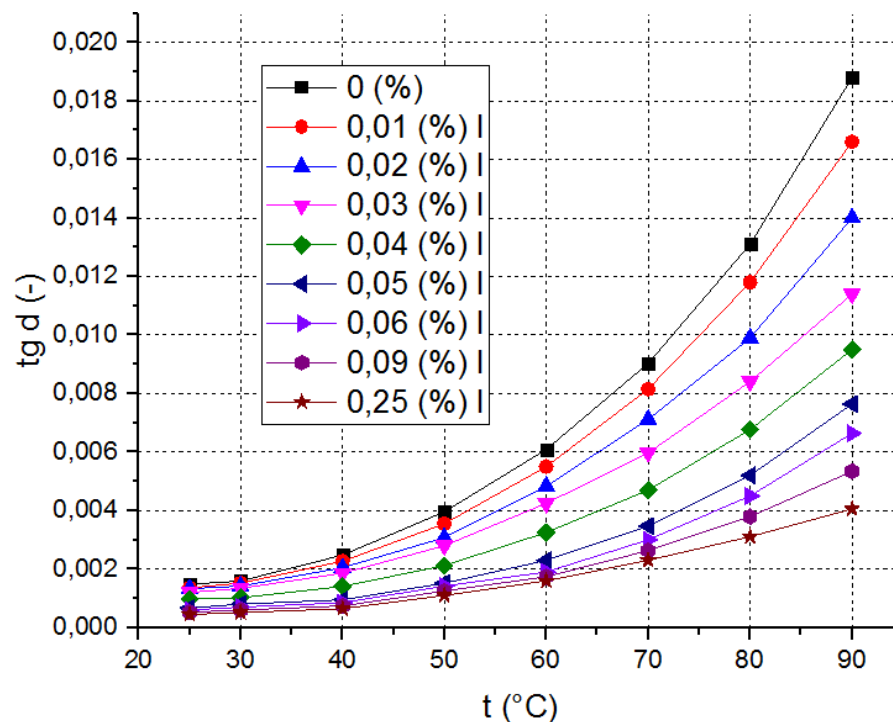
Pro měření ztrátového činitele byly použity vzorky fluidních systémů s dispergovanými nanopřířadami typu I, vyrobené podle kapitoly 5. Stejně jako v kapitole 8.1.1 byly vzorky o objemu 40 (ml) pomocí injekční stříkačky umístěny do prostoru měřícího kondenzátoru pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903. Elektrodotový systém pro měření kapalných dielektrik Tettex 2903 byl připojen na analyzátor olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831. Po skončení měření byl prostor měřícího kondenzátoru zbaven použitého fluidního systému, rozebrán a očištěn. Postup čištění je rozveden v kapitole 8.1.1. Základní statistické parametry ztrátového činitele všech vyhodnocovaných fluidních systémů jsou uvedeny v příloze (tab. 52 – tab. 68). K vyhodnocení požadovaného ztrátového činitele byl použit aritmetický průměr z naměřených hodnot. Tloušťka všech vyhodnocovaných vzorků byla při každém měření vždy stejná, protože byla definována vzdáleností 0,002 (m) mezi měřicí a napěťovou elektrodou elektrodotového systému Tettex 2903.

#### Získané výsledky a jejich vyhodnocení

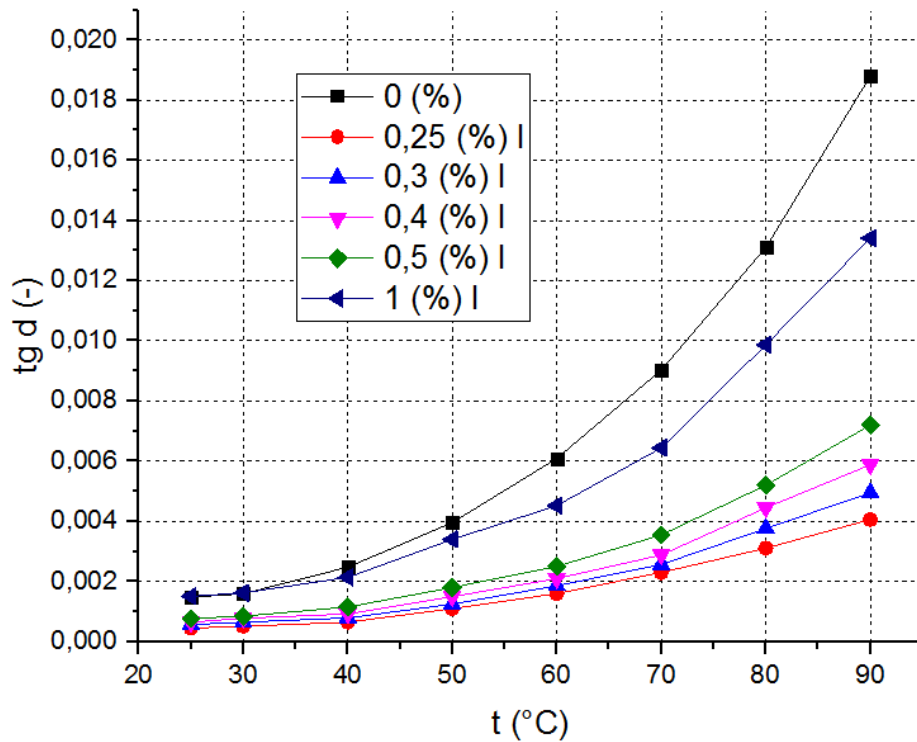
Obr. 8.1.9 představuje závislost ztrátového činitele fluidního systému s nanopřířadou I pro koncentrace od 0 (%) do 0,25 (%) na teplotě. Je zvolena teplotní závislost ztrátového



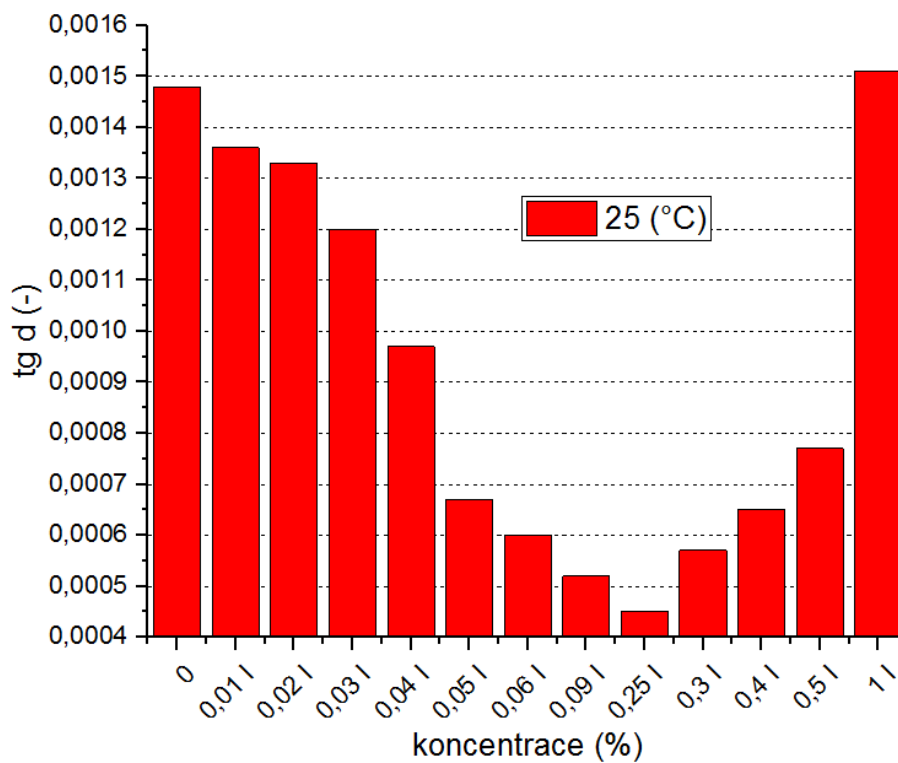
činitele, protože velikost ztrátového činitele je na změnách teploty silně závislá. Hodnoty ztrátového činitele klesají s rostoucím množstvím nanopřísad I ve fluidním systému [78], až do hodnoty 0,25 (%). Na obr. 8.1.10 je vidět závislost ztrátového činitele fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0,25 (%) do 1 (%), včetně 0 (%), na teplotě. Hodnoty ztrátového činitele rostou od hodnoty 0,25 (%) a blíží se hodnotám ztrátového činitele fluidního systému bez dispergovaných nanopřísad. Pro obr. 8.1.9 a 8.1.10 platí, že s rostoucí teplotou ztrátový činitel stoupá, protože roste počet volných nosičů elektrického náboje ve fluidním systému [79, 40]. Tyto volné nosiče elektrického náboje, převážně ve formě iontů, jsou produkovány disociací pevných nečistot, které jsou ve fluidním systému přítomny [71, 72-74]. Disociaci pevných nečistot je možné omezit pomocí určitých inhibitorů, které vylepšují oxidační stabilitu fluidního systému. Podle [75] jsou však inhibitory postupně spotřebovávány vlivem oxidačních reakcí v průběhu stárnutí oleje. Na obr. 8.1.9 a 8.1.10 nejsou patrné vrcholy žádných relaxačních procesů, protože se relaxační procesy (dipólová relaxační a Maxwell-Wagner-Sillars polarizace) začínají výrazněji projevovat až v oblastech nižších teplot [77, 40]. Na obr. 8.1.11 je zobrazen sloupcový diagram závislosti ztrátového činitele fluidního systému na koncentraci nanopřísad I při teplotě 25 (°C). Ztrátový činitel podle očekávání klesá až do koncentrace 0,25 (%) a poté začíná stoupat.



Obr. 8.1.9 Závislost ztrátového činitele fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0 (%) do 0,25 (%) na teplotě



Obr. 8.1.10 Závislost ztrátového činitele fluidního systému s nanopřísadou I pro koncentrace od 0,25 (%) do 1 (%), včetně 0 (%), na teplotě



Obr. 8.1.11 Sloupcový diagram závislosti ztrátového činitele fluidního systému na koncentraci nanopřísady I při teplotě 25 (°C)

## 9 Optimální fluidní systém

V této kapitole je obsaženo přesné znění podaného užitého vzoru 30 268 s názvem Elektroizolační biologicky odbouratelná kapalina. Jedná se o plně odbouratelný elektroizolační olej, který splňuje požadavky normy ČSN EN 62770. Je plně retrofitní, neobsahuje korozivní síru a obsahuje malé množství aditiv včetně nanopřířady.

### 9.1 Oblast techniky

Technické řešení se týká nové biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny na bázi speciálně upraveného rostlinného oleje. Tuto elektroizolační kapalinu lze použít k plnění elektrických zařízení, především hermetizovaných transformátorů, používaných při výrobě a distribuci elektrické energie a provozovaných zejména v místech zvýšené ochrany životního prostředí.

### 9.2 Dosavadní stav techniky

Elektroizolační kapaliny jsou v současné době převážně minerální oleje vyráběné rafinací surové ropy a dalšími technologickými postupy. Tyto oleje slouží jako kapalná složka izolačních systémů v transformátorech různých napěťových úrovní a jejich používání je určeno normami ČSN EN 60296 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité minerální izolační oleje pro transformátory a vypínače“ a ČSN EN 604229 „Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních – Návod pro kontrolu a údržbu“.

Výhodou minerálních olejů jsou dobré tepelné a elektroizolační vlastnosti, které si tyto kapaliny udržují i po relativně dlouhé době provozu. Nevýhodou je však jejich velmi špatná biologická odbouratelnost, a proto použití izolačních kapalin na bázi minerálních olejů je problematické zejména v ekologicky citlivých oblastech a v místech se zpřísněným režimem ochrany životního prostředí (chráněná území, blízkost zdrojů pitné vody apod.). V případech nekontrolovatelných úniků těchto kapalin z elektrického zařízení, nebo dokonce havárií celého zařízení, jsou negativní dopady na životní prostředí významné.

Z výše uvedených důvodů získávají stále větší pozornost elektroizolační kapaliny na bázi přírodních esterů, které jsou biologicky odbouratelné. Ve smyslu dokumentu OECD 301-D je zaručena jejich biologická odbouratelnost 95 (%) za 28 dní, a proto i v případech jejich úniků do životního prostředí nebo havárií nedochází k významným ekologickým škodám. Jako optimální a přitom ekonomicky přijatelné výchozí suroviny pro přípravu těchto elektroizolačních kapalin šetrných k životnímu prostředí se jeví běžně dostupné rostlinné oleje

v potravinářské kvalitě, v prostředí České republiky pak především olej řepkový, případně slunečnicový. Tyto potravinářské rostlinné oleje, tak, jak je lze získat na trhu, nemohou sloužit jako biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny. Lze je však upravit tak, aby výsledný produkt splňoval požadavky normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“ a jeho použitelnost jako elektroizolační kapalina tak byla umožněna. Norma ČSN EN 62770 doporučuje, aby elektroizolační kapaliny na bázi rostlinných olejů sloužily jako náplň především hermetizovaných, tj. atmosféricky uzavřených, elektrických zařízení.

### 9.3 Podstata technického řešení

Podstatou technického řešení je biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina na bázi rostlinného oleje. Surovinou k výrobě biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny je běžně dostupný řepkový nebo slunečnicový rostlinný olej v potravinářské kvalitě. Jeho vlastnosti jsou upraveny perkolací a kontaktem s bazickým sorbentem tak, že se zlepší vlastnosti, které jsou důležité pro aplikaci biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny v elektrotechnických aplikacích, tj. zejména obsah vody, číslo kyselosti, přeskokové napětí a ztrátový činitel, při 90 (°C). Upravený rostlinný olej je z důvodu zvýšení odolnosti proti oxidaci dotován přísadkou antioxidantu fenolického typu na výslednou koncentraci maximálně 5 (%) hmotn. Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina splňuje následující parametry: Její biologická odbouratelnost je podle metodiky OECD 301-D minimálně 95 (%) rel. za 28 dní a fyzikálně-chemické parametry odpovídají požadavkům normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“. Výčet kvalitativních požadavků normy ČSN EN 62770 na biologicky odbouratelnou elektroizolační kapalinu na bázi rostlinných olejů je uveden v tab. 9.3.1.

Tab. 9.3.1 Požadavky normy ČSN EN 62770 na vlastnosti biodegradovatelné elektroizolační kapaliny

parametr	limitní hodnota
vzhled	čirý, bez sedimentů a suspenzí
viskozita při 100 (°C)	max. 15 (mm <sup>2</sup> /s)
viskozita při 40 (°C)	max. 50 (mm <sup>2</sup> /s)
bod tekutosti	max. -10 (°C)
obsah vody	max. 200 (mg/kg)
hustota při 20 (°C)	max. 1,0 (g/ml)
průrazné napětí	min. 35 (kV)/2,5 (mm)
ztrátový činitel, tg δ, při 90 (°C)	max. 0,05
číslo kyselosti	max. 0,06 (mg KOH/g)
korozivní síra/DBDS	nepřítomna
aditiva	max. 5 (%) hmotn.

#### 9.4 Příklad provedení

Jako surovina pro přípravu biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny byl z nabídky rostlinných olejů, dostupných na tuzemském trhu, zvolen takový, jehož kvalitativní parametry se nejvíce blížily požadavkům normy ČSN EN 62770. Různá kvalita rostlinných olejů na tuzemském trhu je dokumentovaná v tab. 9.4.1, kde jsou uvedeny příklady vlastností, které je u potravinářských rostlinných olejů nutné upravovat. Pro přípravu finální biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny byl zvolen řepkový olej.

Řepkový olej byl upraven následujícím způsobem: řepkový olej uložený v zásobníku o objemu 200 litrů byl přečerpáván rychlostí 0,5 litrů/min přes kolonu tvaru válce o objemu 50 litrů plněnou sorbentem Alumina CPN (s předchozí termickou aktivací) a následně se vracel do zásobníku. Během procesu byl olej ohříván na teplotu cca 60 (°C) kvůli snížení viskozity a před návratem do zásobníku procházel filtrem tvořeným skládanou buničinou. Olej absolvoval tuto cirkulaci opakovaně a po 24 hodinách provozu se v zásobníku nacházel již pouze upravený řepkový olej. Do takto upraveného řepkového oleje byl přidán a rozpuštěn antioxidant dibutyl-para-kresol tak, aby jeho výsledná koncentrace činila 0,5 (%) hmotn.

Pro upravený řepkový olej byly změřeny fyzikálně-chemické a elektrické parametry, které se pomocí sorbentu upravovaly. Výsledné hodnoty vlastností důležitých v elektrotechnických aplikacích jsou uvedeny v tab. 9.4.1 ve sloupci elektroizolační kapalina.

*Tab. 9.4.1 Příklady vlastností rostlinných olejů v potravinářské kvalitě a finálních vlastností bioodbouratelné elektroizolační kapaliny, limitní hodnoty dle normy ČSN EN 62770*

<b>parametr</b>	<b>limitní hodnota</b>	<b>slunečnicový olej</b>	<b>řepkový olej</b>	<b>elektroizolační kapalina</b>
obsah vody (mg/kg)	max. 200	352	87	44
přeskokové napětí (kV/2,5 mm)	min. 35	30,8	73,5	68,9
ztrátový činitel tg $\delta$ , při 90 °C	max. 0,05	0,0706	0,0048	0,0032
číslo kyselosti (mg KOH/g)	max. 0,06	0,088	0,091	0,038
obsah antioxidantu (% hmotn.)	max. 5,0	-	-	0,5

## 9.5 Průmyslová využitelnost

Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina na bázi rostlinného oleje, která je předmětem tohoto užitého vzoru, je určena pro použití jako kapalná složka elektroizolačních systémů elektrických zařízení, především hermetizovaných transformátorů, provozovaných zejména v místech zvýšené ochrany životního prostředí (intervilány obcí, chráněná přírodní území, zdroje pitné vody, apod.). V případě úniků elektroizolační kapaliny (často i vinou neoprávněného odčerpání), nebo v mimořádném případě havárie elektrického zařízení je nebezpečí kontaminace životního prostředí díky snadné biologické odbouratelnosti této elektroizolační kapaliny velmi sníženo až eliminováno.

Průmyslovou využitelnost této elektroizolační kapaliny podporuje skutečnost, že její výroba není technologicky významně náročná a s výhodou lze použít tuzemské vstupní suroviny (řepkový, případně slunečnicový olej). Předpokládá se tak její ekonomická přijatelnost a z toho vyplývající široké možnosti využívání.

## 9.6 Nároky na ochranu

1. Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina vyznačující se tím, že obsahuje upravené rostlinné oleje a antioxidant, přičemž její biologická odbouratelnost je minimálně 95 (%) relativních za 28 dní, obsah vody je maximálně 200 (mg/kg), číslo kyselosti maximálně 0,6 (mg KOH/g), průrazné napětí minimálně 35 (kV)/2,5 (mm) a ztrátový činitel  $\tan \delta$  při 90 (°C) maximálně 0,05.
2. Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina podle nároku 1. vyznačující se tím, že dále obsahuje max. 5 (%) hmotnostních antioxidantu fenolického typu.
3. Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina podle nároků 1. a 2. vyznačující se tím, že ve výhodném provedení je rostlinným olejem řepkový nebo slunečnicový olej potravinářské kvality.

## 10 Přínos práce pro vědní obor a výstupy pro praxi

V této práci jsem provedl rozbor současného stavu modifikace fluidních systémů nanopřísadami. Dále bylo zapotřebí rozvést aspekty interakce především kapalných dielektrik a elektrického pole. Po této kapitole došlo k určení potřebného diagnostického systému. V práci jsem se nadále zabýval stanovením optimálního fluidního systému pomocí přeskokového napětí a výzkumem a hodnocením dalších rozhodujících elektrických parametrů tohoto vybraného fluidního systému. Z této části práce pak vyplynulo vytvoření a podání užitého vzoru. Cíle práce byly splněny.

Tato práce se zabývá ověřením možností modifikace vlastností přírodního esteru nanopřísadami. Zejména bylo zapotřebí ověřit elektrické vlastnosti modifikované kapaliny. Předmětem výzkumu této práce byla biodegradabilní elektroizolační kapalina s dispergovanou povrchově upravenou nanopřísadou  $\text{TiO}_2$ . Byla nalezena biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina vyznačující se tím, že obsahuje inhibovaný řepkový olej, přičemž její biologická odbouratelnost je podle metodiky OECD 301-D minimálně 95 (%) rel. za 28 dní a fyzikálně-chemické parametry odpovídají požadavkům normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“. Výzkumem objevená biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina s dispergovanými nanočásticemi se vyznačuje především tím, že podstatným způsobem vylepšuje elektrické vlastnosti ENVITRAFOLU (tab. 10.1).

Tab. 10.1 Porovnání vyhodnocovaných elektrických vlastností ENVITRAFOLU a ENVITRAFOLU s 0,25 (%) adaptovaných nanočástic TiO<sub>2</sub>

parametr	ENVITRAFOL	ENVITRAFOL s 0,25 (%) adaptovaných nanočástic TiO <sub>2</sub>
přeskokové napětí (kV/2,5 mm), při 25 (°C)	52,51	80,15
polarizační index (-), při 25 (°C)	1,1127	1,6667
polarizační index (-), při 90 (°C)	1,0039	1,1111
rezistivita (GΩ.m), při 25 (°C)	109,09	741,55
rezistivita (GΩ.m), při 90 (°C)	8,77	46,13
reálná složka komplexní permitivity (-), při 25 (°C)	2,96	3,16
reálná složka komplexní permitivity (-), při 90 (°C)	2,71	2,84
ztrátový činitel (-), při 25 (°C)	0,00148	0,00045
ztrátový činitel (-), při 90 (°C)	0,0188	0,00406

Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina na bázi řepkového oleje, která je výstupem tohoto výzkumu, je určena pro použití jako kapalná složka elektroizolačních systémů elektrických zařízení, především hermetizovaných transformátorů, provozovaných zejména v místech zvýšené ochrany životního prostředí (intervilány obcí, chráněná přírodní území, zdroje pitné vody, apod.). V případě úniků elektroizolační kapaliny (často i vinou neoprávněného odčerpání), nebo v mimořádném případě havárie elektrického zařízení je nebezpečí kontaminace životního prostředí. Avšak díky snadné biologické odbouratelnosti nově vyvinuté elektroizolační kapaliny je vliv na životní prostředí velmi snížen až eliminován. Využitelnost této biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny podporuje skutečnost, že její výroba není technologicky významně náročná a s výhodou lze použít tuzemské vstupní suroviny.



Za zcela původní lze v práci považovat:

- Navržený diagnostický systém
- Zjištění možností modifikace fluidních systémů s nanopřísadami
- Optimalizace technologie dispergace nanopřísad do fluidního systému
- Vytipování vhodného nanoplňiva
- Stanovení optimální varianty nového fluidního systému
- Zpracování a podání užitečného vzoru na nově vyvinutý fluidní systém

## Závěr

Tato práce se zabývá shrnutím současného stavu kapalných dielektrik, rozvedením aspektů interakce dielektrik a elektrického pole, stanovením potřebného diagnostického systému, optimalizací nanopřísad a stanovení fluidního systému, výzkumem a hodnocením rozhodujících elektrických parametrů vybraného fluidního systému a vytvořením a podáním užitečného vzoru optimálního fluidního systému. Původní myšlenka spočívá v tom, že cílem této práce bylo ověření možností modifikace elektrických vlastností inhibovaného řepkového oleje vhodnými nanopřísadami se zřetelem k praktické aplikaci získaného fluidního systému jako elektroizolační kapaliny. Dále je potřebné velmi zdůraznit, že použité nanopřísady jsou k životnímu prostředí zcela inertní.

Biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina na bázi řepkového oleje, která je předmětem podaného užitečného vzoru, je určena pro použití jako kapalná složka elektroizolačních systémů elektrických zařízení, především hermetizovaných transformátorů, provozovaných zejména v místech zvýšené ochrany životního prostředí (intervilány obcí, chráněná přírodní území, zdroje pitné vody, apod.). V případě úniků elektroizolační kapaliny (často i vinou neoprávněného odčerpání), nebo v mimořádném případě havárie elektrického zařízení je nebezpečí kontaminace životního prostředí. Avšak díky snadné biologické odbouratelnosti nově vyvinuté elektroizolační kapaliny je vliv na životní prostředí velmi snížen až eliminován. Průmyslovou využitelnost této biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny podporuje skutečnost, že její výroba není technologicky významně náročná a s výhodou lze použít tuzemské vstupní suroviny.

Jak již bylo zmíněno, tato práce se zabývá ověřením možností modifikace vlastností přírodního esteru nanopřísadami. Zejména bylo zapotřebí ověřit elektrické vlastnosti modifikované kapaliny. Předmětem výzkumu této práce byla biodegradabilní elektroizolační kapalina s dispergovanou povrchově upravenou nanopřísadou  $\text{TiO}_2$ . Byla

nalezena biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina vyznačující se tím, že obsahuje inhibovaný řepkový olej, přičemž její biologická odbouratelnost je podle metodiky OECD 301-D minimálně 95 (%) rel. za 28 dní a fyzikálně-chemické parametry odpovídají požadavkům normy ČSN EN 62770 „Kapaliny pro elektrotechnické aplikace – Nepoužité kapaliny na bázi přírodních esterů pro transformátory a podobná elektrická zařízení“. Výzkumem objevená biologicky odbouratelná elektroizolační kapalina s dispergovanými nanočásticemi se vyznačuje také tím, že finální elektrické vlastnosti získané elektroizolační kapaliny jsou na dobré úrovni.

## Seznam použité literatury

- [1] Jin H., Andritsch T., Tsekmes I. A., Kochetov R., Morshuis P. H. F., Smit J. J. Properties of Mineral Oil based Silica Nanofluids. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 21 (3), 2014, 1100-1108.
- [2] Mergos J. A., Athanassopoulou M. D., Argyropoulos T. G., Dervos C. T. Dielectric Properties of Nanopowder Dispersions in Paraffin Oil. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (5), 2012, 1502-1507.
- [3] Fuxin W., Ming D., Jianzhuo D., Ming R., Rixin Y. Study of Breakdown Mechanism of Transformer Oil Based on ZnO Nanoparticles. *Konference: International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, 2015.
- [4] Das S. K., Choi S. U., Yu W., Pradeep T. *Nanofluids: Science and Technology*. 1. vyd. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. ISBN-13: 978-0470074732, ISBN-10: 0470074736.
- [5] Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 (1), 2000, 58-64.
- [6] Putra N., Roetzel W, Das S. K. Natural Convection of Nano-fluids. *Heat and Mass Transfer*, 39, 2003, 775-784.
- [7] Barber J., Brutin D, Tadrist L. A Review on Boiling Heat Transfer Enhancement with Nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 6, 2011, 1-16.
- [8] Mali S., Pise A., Acharya A. Review on Flow Boiling Heat Transfer Enhancement with Nanofluids. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11 (2), 2014, 43-48.
- [9] Ahn H. S., Kim M. H., Acharya A. A Review on Critical Heat Flux Enhancement With Nanofluids and Surface Modification. *Journal of Heat Transfer*, 134, 2012, 1-13.
- [10] Oueslati F. S., Bennacer R. Heterogeneous Nanofluids: Natural Convection Heat Transfer Enhancement. *Nanoscale Research Letters*, 6, 2011, 1-11.

- [11] Philip J., Shima P. D. Thermal Properties of Nanofluids. *Advances in Colloid and Interface Science*, 183-184, 2012, 30-45.
- [12] Xue Q. Z. Model for Effective Thermal Conductivity of Nanofluids. *Physics Letters A*, 307 (5-6), 2003, 313-317.
- [13] Wang L., Wei X. Nanofluids: Synthesis, Heat Conduction, and Extension. *Journal of Heat Transfer*, 131 (3), 2009.
- [14] Bashirnezhad K., Bazri S., Safaei M. R., Goodarzi M., Dahari M., Mahian O., Dalkılıç A. S., Wongwises S. Viscosity of Nanofluids: A Review of Recent Experimental Studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 2016, 114-123.
- [15] Mahbubul I. M., Saidur R., Amalina M. A. Latest Developments on the Viscosity of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (4), 2012, 874-885.
- [16] Mishra P. Ch., Mukherjee S., Nayak S. K., Panda A. A Brief Review on Viscosity of Nanofluids. *International Nano Letters*, 4 (4), 2014, 109-120.
- [17] Liu J., Zhou L., Wu G., Zhao Y., Liu P., Peng Q. Dielectric Frequency Response of Oil-paper Composite Insulation Modified by Nanoparticles. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2), 2012, 510-520.
- [18] Kučerová E. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [19] Skálová J., Koutský J., Motyčka V. *Nauka o materiálech*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [20] Kellö V., Tkáč A. *Fyzikálna chémia*. 3. přeprac. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1969. 63-551-77.
- [21] Brown T. L., LeMay H. E., Bursten B. E., Burdge J. R. *Chemistry: The Central Science*. 9. vyd. New Jersey: Prentice-Hall, 2003. ISBN 0-13-038168-3.
- [22] Mentlík V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN-technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [23] Tirpák A. *Elektromagnetizmus*. 3. dopl. vyd. Bratislava: IRIS, Vydavateľstvo a tlač, 2012. ISBN 978-80-89256-92-1.
- [24] Hassdenteufel J., Květ K. a kolektiv. *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. 04-540-67.
- [25] Šavel J. *Elektrotechnologie: Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4. rozš. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 978-80-7300-190-2.

- [26] Polák R., Zahradník R. *Obecná chemie: Stručný úvod*. Praha: Academia, 2000. ISBN 80-200-0794-6.
- [27] Moore W. J. *Fyzikální chemie: Physical Chemistry (Orig.)*. Překlad Černý Č., Schütz A. 2. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981. 04-604-81.
- [28] Sadiku M. N. O. *Elements of Electromagnetics*. 5. vyd. New York: Oxford University Press, 2011. ISBN 978-0-19-974300-1.
- [29] Barnard A. K. *Teoretické základy anorganické chemie: Theoretical Basic of Inorganic Chemistry (Orig.)*. Překlad Jenšovský L. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1975. 04-6178-75.
- [30] Hill J. W., Petrucci R. H. *General Chemistry: An Integrated Approach*. 3. vyd. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. ISBN 0-13-061996-5.
- [31] Atkins P., de Paula J. *Physical Chemistry*. 7. vyd. New York: W. H. Freeman and Company, 2002. ISBN 0-7167-3539-3.
- [32] Mijovic J., Kenny J. M., Maffezzoli A., Trivisano A., Bellucci F., Nicolais L. The Principles of Dielectric Measurements for in Situ Monitoring of Composite Processing. *Composites Science and Technology*, 49, 1993, 277-290.
- [33] Feldman Y., Puzenko A., Ryabov Y. M. *Dielectric Relaxation Phenomena in Complex Materials*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006, 1-125. ISBN 978-0-471-72507-7.
- [34] Mijovic J., Fitz B. D. *Dielectric Spectroscopy of Reactive Polymers*. USA (New York): Department of Chemical Engineering, Chemistry and Materials Science, Polytechnic University, 1998, 1-25.
- [35] Vassilikou-Dova A., Kalogeras I. M. *Dielectric Analysis (DEA)*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009, 497-613. ISBN 978-0-471-76917-0.
- [36] Hippel A. *Dielectric Materials and Applications*. Boston: Artech House., 1995. ISBN 1-58053-123-7.
- [37] Rochester S. M., Budker D. Atomic Polarization Visualized. *American Journal of Physics*, 69 (450), 2001, 1-5.
- [38] Balanis C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*. 2. vyd. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-0-470-58948-9.
- [39] Hakme C., Stevenson I., David L., Boiteux G., Seytre G., Schönhals A. Uniaxially Stretched Poly (Ethylene Naphthalene 2,6-Dicarboxylate) Films Studied by Broadband Dielectric Spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids* 351, 2005, 2742-2752.
- [40] Bartnikas R. a kolektiv. Dielectric Loss in Insulating Liquids. *Electrical Insulation*, 2 (1), 1967, 33-54.

- [41] Hardy L., Fritz A., Stevenson I., Boiteux G., Seytre G., Schönhals A. Dielectric Relaxation Behaviour of Poly (Ethylene Naphthalene 2,6 Dicarboxylate) (PEN). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 305, 2002, 174-182.
- [42] Prodromakis T., Papavassiliou C. Engineering the Maxwell-Wagner Polarization Effect. *Applied Surface Science*, 255, 2009, 6989-6994.
- [43] Kremer F., Schönhals A. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. New York: Springer, 2003. ISBN 978-3-540-43407-8.
- [44] Raju G. G. *Dielectrics in Electric Fields*. New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN 978-082470864-1.
- [45] Emmert S., Wolf M., Gulich R., Krohns S., Kastner S., Lunkenheimer P., Loidl A. Electrode Polarization Effects in Broadband Dielectric Spectroscopy. *The European Physical Journal B*, 83, 2011, 157-165.
- [46] Mentlík V., Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN-technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [47] Lvovich V. F. *Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-0-470-62778-5.
- [48] Beaty H. W. *Electrical Engineering Materials Reference Guide*. New York: McGraw-Hill, 1990. ISBN 0-07-004196-2.
- [49] Eckertová L. a kolektiv. *Fyzikální elektronika pevných látek*. Praha: Univerzita Karlova, 1992. ISBN 80-7066-535-1.
- [50] Richert R., Wagner H. The Dielectric Modulus: Relaxation versus Retardation. *Solid State Ionics*, 105, 1998, 167-173.
- [51] Kasprowicz B., Kielich S., Przeniczny Z. Complete Dielectric Saturation in Dilute Solutions of Asymmetric Macromolecules. Poznań: Institute of Physics, A. Mickiewicz University, 1970, 47-66.
- [52] Ida N. *Engineering Electromagnetics*. 7. vyd. New York: Springer, 2004. ISBN 978-0-387-20156-6.
- [53] Guru B., Hiziroğlu H. *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*. 2. vyd. Boston: PWS, 2004. ISBN 0-521-83016-8.
- [54] Vaughan W. E. Dielectric Relaxation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 30, 1979, 103-124.
- [55] Williams G., Thomas D. K. *Phenomenological and Molecular Theories of Dielectric and Electrical Relaxation of Materials*. United Kingdom (Swansea): Department of Chemistry, University of Wales Swansea, Singleton Park, 1998, 1-25.

- [56] Pethrick R. A., Hayward D. Real Time Dielectric Relaxation Studies of Dynamic Polymeric Systems. *Progress in Polymer Science*, 27 (9), 2002, 1983-2017.
- [57] Das P. R., Pati B., Sutar B. C., Choudhury R. N. P. Study of Structural and Electrical Properties of a New Type of Complex Tungsten Bronze Electroceramics;  $\text{Li}_2\text{Pb}_2\text{Y}_2\text{W}_2\text{Ti}_4\text{V}_4\text{O}_{30}$ . *Journal of Modern Physics*, 3 (8), 2012.
- [58] Zhao Ch., Zhao Z., Werner M., Taylor S., Chalker P. Dielectric relaxation of high-k oxides. *Nanoscale Research Letters*, 8 (456), 2013.
- [59] Feldman Y., Puzenko A., Ryabov Y. Non-Debye Dielectric Relaxation in Complex Materials. *Chemical Physics*, 284, 2002, 139-168.
- [60] Kao K. Ch. *Dielectric Phenomena in Solids*. Boston: Academic Press, 2004. ISBN: 0-12-396561-6.
- [61] Havriliak S., Negami S. A Complex Plane Representation of Dielectric and Mechanical Relaxation Process in Some Polymers. *Polymer*, 8, 1967, 161-210.
- [62] Sengwa R. J., Choudhary S., Sankhla S. Low Frequency Dielectric Relaxation Processes and Ionic Conductivity of Montmorillonite Clay Nanoparticles Colloidal Suspension in Poly (Vinyl Pyrrolidone)-Ethylene Glycol Blends. *eXPRESS Polymer Letters*, 2 (11), 2008, 800-809.
- [63] Rout J., Padhee R., Das P. R., Choudhary R. N. P. Structural, Dielectric and Electrical Properties of  $\text{BiFeW}_2\text{O}_9$  Ceramics. *Advances in Applied Physics*, 1 (3), 2013, 105-116.
- [64] Fofana I. 50 Years in Development of Insulating Liquids. *Electrical Insulation Magazine*, 29 (5), 2013, 13-25.
- [65] Spohner M., Frk M., Liedermann K. Study of Electrical and Rheological Properties of Natural and Other Oils. *Konference: Electrical Insulation (ISEI)*, 2012, 30-33.
- [66] Návod k obsluze k vysokonapětovému zdroji Siemens LM 30 Power Module a Siemens SM4 Control Module.
- [67] Návod k obsluze analyzátoru olejů a pevných dielektrik Tettex 2830/2831 Haefely Test AG.
- [68] Iorga C. Compartmental Analysis of Dielectric Absorption in Capacitors. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 7 (2), 2000, 187-192.
- [69] Kuenen J. C., Meijer G. C. M. Measurement of Dielectric Absorption of Capacitors and Analysis of its Effects on VCO's. *Instrumentation and Measurement*, 45 (1), 1996, 89-97.
- [70] Toliyat H. A., Kliman G. B. *Handbook of Electric Motors*. 2. vyd. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 978-0-8247-4105-1.

- [71] Abdelmalik A. A., Fothergill J. C., Dodd S. J. Electrical Conduction and Dielectric Breakdown Characteristics of Alkyl Ester Dielectric Fluids obtained from Palm Kernel Oil. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (5), 2012, 1623-1632.
- [72] Abdelmalik A. A. Charge Dynamics in Vegetable Oil-Based Ester Dielectric Fluid. *British Journal of Applied Science & Technology*, 4 (2), 2014, 371-386.
- [73] Paraskevas C. D., Vassiliou P., Dervos C. T. Temperature Dependent Dielectric Spectroscopy in Frequency Domain of High-Voltage Transformer Oils Compared to Physicochemical Results. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 13 (3), 2006, 539-546.
- [74] Pecovska-Gjorgjevich M., Andonovski A., Velevska J. Dielectric Constant and Induced Dipole Moment of Edible Oils Subjected to Conventional Heating. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 31 (2), 2012, 285-294.
- [75] Rouse T. O. Mineral Insulating Oil in Transformers. *Electrical Insulation Magazine*, 14 (3), 1998, 6-16.
- [76] Liu R., Pettersson L. A. A., Auletta T. Hjortstam O. Ester Fundamental Research on the Application of Nano Dielectrics to Transformers. *Konference: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2011, 423-427.
- [77] Ulrych J., Mentlík V. Dielectric Properties of Sunflower, Rapeseed and Commonly Used Mineral Oil. *Konference: Electric Power Engineering (EPE)*, 2016, 347-350.
- [78] Liu J., Zhou L., Wu G., Zhao Y. Dielectric Frequency Response of Oil-paper Composite Insulation Modified by Nanoparticles. *Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2), 2012, 510-520.
- [79] Ulrych J., Svoboda M., Polanský R., Pihera J. Dielectric Analysis of Vegetable and Mineral Oils. *Konference: Dielectric Liquids (ICDL)*, 2014, 1-4.

## Seznam odborných publikací autora

### Kvalifikační práce

- [1] Ulrych J. Elektrické kontaktní přístroje v extrémních podmínkách. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, KEE, 2010.
- [2] Ulrych J. Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, KET, 2012.
- [3] Ulrych J. Aspekty aplikace fluidních systémů. Písemná práce ke státní doktorské zkoušce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, KET, 2015.

### Články s českých konferencí

- [4] Ulrych J. Dielektrická spektroskopie v elektrotechnologické diagnostice. Konference: Elektrotechnika a informatika (EI), 2012, 155-158.
- [5] Ulrych J., Polanský R., Pihera J. Dielektrická analýza polyetylen tereftalátové a polyetylen naftalátové fólie. Konference: Elektrotechnika a informatika (EI), 2013, 163-166.
- [6] Ulrych J., Koutsomitopoulou A., Partridge I. Sledování procesu vytvrzování epoxidové pryskyřice pomocí analýzy dielektrických vlastností. Konference: Elektrotechnika a informatika (EI), 2014, 147-150.
- [7] Ulrych J., Mentlík V. Elektroizolační fluidní systémy a jejich vlastnosti. Konference: Elektrotechnika a informatika (EI), 2015, 115-118.

### Články z českých mezinárodních konferencí

- [8] Ulrych J., Polanský R., Pihera J., Voborník A. Comparison of Accuracy of Precision LCR Meter During Dielectric Properties Measurement. Konference: Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE), 2013, 41-44.
- [9] Ulrych J., Polanský R., Pihera J. Dielectric Analysis of Polyethylene Terephthalate (PET) and Polyethylene Naphthalate (PEN) Films. Konference: Electric Power Engineering (EPE), 2014, 411-415.
- [10] Ulrych J., Mentlík V. Dielectric Properties of Sunflower, Rapeseed and Commonly Used Mineral Oil. Konference: Electric Power Engineering (EPE), 2016, 347-350.
- [11] Ulrych J., Mentlík V. Dielectric Properties of Fluid Systems with Dispersed Nanoparticles. Konference: Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE), 2016, 150-153.



- [12] Ulrych J., Totzauer P., Mentlík V. Dielectric Properties of Modified Natural Ester – Perspective Electrical Insulating Liquid. Conference: Electric Power Engineering (EPE), 2017.

### Články ze zahraničních konferencí

- [13] Pihera J., Polanský R., Prosr P., Ulrych J. Dielectric Spectroscopy of Thermally Aged Insulation. Conference: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012, 862-865.
- [14] Pihera J., Polanský R., Prosr P., Ulrych J. Dielectric Changes of PET and Glass-fiber Based Epoxy Composites During Thermal Aging. Conference: Electrical Insulation (ISEI), 2013, 666-669.
- [15] Ulrych J., Svoboda M., Polanský R., Pihera J. Dielectric Analysis of Vegetable and Mineral Oils. Conference: Dielectric Liquids (ICDL), 2014, 1-4.
- [16] Totzauer P., Hornak J., Trnka P., Harvánek L., Mentlík V., Ulrych J. Diagnostics of Composite Insulation Materials for Simple Online Diagnostics Tools. Conference: International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016.
- [17] Totzauer P., Trnka P., Mentlík V., Hornak J., Kadlec P., Ulrych J., Pihera J. A Study of Various Inhibitor Mixtures in Natural Ester Oil. Conference: Dielectric Liquids (ICDL), 2017.
- [18] Ulrych J., Totzauer P., Mentlík V. Modified Natural Ester – Perspective Electrical Insulating Liquid. Conference: Dielectric Liquids (ICDL), 2017.

### Časopisy

- [19] Mentlík V., Ulrych J. Nanočástice zlepšují vlastnosti fluidních systémů pro elektrotechniku. A-Z ELEKTRO, 8 (2), 2017, 108-109. ISSN 1805-1073.
- [20] Mentlík V., Trnka P., Ulrych J. Elektroizolační kapalina šetřící životní prostředí. A-Z ELEKTRO, 8 (3), 2017, 82-84. ISSN 1805-1073.

### Impaktované časopisy

- [21] Ulrych J., Mentlík V. Electrical Properties of Modified Natural Ester – Perspective Electrical Insulating Liquid. Materials Letters (Impact Factor: 2.437), ISSN: 0167-577X. *(v recenzním řízení)*

### Užité vzory

- [22] Mentlík V., Ulrych J. Elektroizolační biologicky odbouratelná kapalina. Užité vzory 30 268, 2017.

**Ostatní**

- [23] Pihera J., Ulrych J. Analýza dielektrických vlastností epoxidových vzorků. Výzkumná zpráva, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, KET, 2013.
- [24] Ulrych J. Sledování procesu vytvrzování epoxidové pryskyřice pomocí analýzy dielektrických vlastností. Závěrečná zpráva. University of Bristol, Faculty of Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2014.
- [25] Mentlík V., Trnka P., Hornak J., Totzauer P., Ulrych J. Izolační kapaliny šetrné k životnímu prostředí. Výzkumná zpráva TA03020251. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, KET/ET, 2016.

## Seznam příloh

### Příloha 1: Základní statistické veličiny rozhodujících elektrických parametrů

Tab. 1 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému s obsahem nanopřísad 0 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,086	1,029	1,028	1,044	1,006	1,043	1,006	1,000
2. hodnota	1,131	1,053	1,084	1,005	1,012	1,000	1,011	1,004
3. hodnota	1,161	1,086	1,027	1,002	1,005	1,003	1,000	1,005
4. hodnota	1,094	1,026	1,005	1,048	1,049	1,006	1,000	1,000
5. hodnota	1,093	1,084	1,013	1,019	1,008	1,005	1,019	1,012
Max (kV)	1,161	1,086	1,084	1,048	1,049	1,043	1,019	1,012
Min (kV)	1,086	1,026	1,005	1,002	1,005	1,000	1,000	1,000
R (kV)	0,075	0,060	0,079	0,046	0,044	0,043	0,019	0,012
Me (kV)	1,094	1,053	1,027	1,019	1,008	1,005	1,006	1,004
$X_{0,25}$ (kV)	1,093	1,029	1,013	1,005	1,006	1,003	1,000	1,000
$X_{0,75}$ (kV)	1,131	1,084	1,028	1,044	1,012	1,006	1,011	1,005
$\mu$ (kV)	1,113	1,056	1,031	1,024	1,016	1,011	1,007	1,004
$\sigma$ (kV)	0,029	0,026	0,028	0,019	0,017	0,016	0,007	0,004
$\sigma^2$ (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
v (%)	2,578	2,442	2,685	1,877	1,641	1,575	0,714	0,438

Tab. 2 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,01 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,186	1,043	1,074	1,064	1,059	1,009	1,007	1,006
2. hodnota	1,129	1,098	1,012	1,005	1,004	1,013	1,002	1,004
3. hodnota	1,123	1,035	1,071	1,051	1,006	1,015	1,009	1,002
4. hodnota	1,116	1,095	1,039	1,008	1,000	1,005	1,019	1,009
5. hodnota	1,179	1,092	1,025	1,028	1,041	1,026	1,014	1,012
Max (kV)	1,186	1,098	1,074	1,064	1,059	1,026	1,019	1,012
Min (kV)	1,116	1,035	1,012	1,005	1,000	1,005	1,002	1,002
R (kV)	0,070	0,063	0,062	0,059	0,059	0,021	0,017	0,010
Me (kV)	1,129	1,092	1,039	1,028	1,006	1,013	1,009	1,006
$X_{0,25}$ (kV)	1,123	1,043	1,025	1,008	1,004	1,009	1,007	1,004
$X_{0,75}$ (kV)	1,179	1,095	1,071	1,051	1,041	1,015	1,014	1,009
$\mu$ (kV)	1,147	1,073	1,044	1,031	1,022	1,014	1,010	1,007
$\sigma$ (kV)	0,030	0,028	0,025	0,023	0,024	0,007	0,006	0,004
$\sigma^2$ (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
v (%)	2,589	2,575	2,361	2,255	2,313	0,699	0,579	0,353

Tab. 3 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,02 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,217	1,076	1,088	1,075	1,042	1,006	1,003	1,003
2. hodnota	1,181	1,104	1,026	1,036	1,011	1,007	1,032	1,001
3. hodnota	1,164	1,052	1,032	1,006	1,004	1,032	1,002	1,025
4. hodnota	1,214	1,127	1,048	1,007	1,069	1,008	1,024	1,002
5. hodnota	1,136	1,066	1,089	1,064	1,003	1,044	1,005	1,018
Max (kV)	1,217	1,127	1,089	1,075	1,069	1,044	1,032	1,025
Min (kV)	1,136	1,052	1,026	1,006	1,003	1,006	1,002	1,001
R (kV)	0,081	0,075	0,063	0,069	0,066	0,038	0,030	0,024
Me (kV)	1,181	1,076	1,048	1,036	1,011	1,008	1,005	1,003
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,164	1,066	1,032	1,007	1,004	1,007	1,003	1,002
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,214	1,104	1,088	1,064	1,042	1,032	1,024	1,018
μ (kV)	1,182	1,085	1,057	1,038	1,026	1,019	1,013	1,010
σ (kV)	0,031	0,027	0,027	0,028	0,026	0,016	0,012	0,010
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
v (%)	2,590	2,492	2,558	2,737	2,521	1,537	1,222	0,973

Tab. 4 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,03 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,227	1,153	1,129	1,044	1,014	1,007	1,068	1,028
2. hodnota	1,205	1,084	1,062	1,035	1,024	1,061	1,004	1,005
3. hodnota	1,192	1,087	1,061	1,096	1,012	1,069	1,009	1,004
4. hodnota	1,265	1,131	1,117	1,083	1,075	1,014	1,002	1,039
5. hodnota	1,278	1,135	1,066	1,032	1,066	1,015	1,032	1,003
Max (kV)	1,278	1,153	1,129	1,096	1,075	1,069	1,068	1,039
Min (kV)	1,192	1,084	1,061	1,032	1,012	1,007	1,002	1,003
R (kV)	0,086	0,069	0,068	0,064	0,063	0,062	0,066	0,036
Me (kV)	1,227	1,131	1,066	1,044	1,024	1,015	1,009	1,005
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,205	1,087	1,062	1,035	1,014	1,014	1,004	1,004
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,265	1,135	1,117	1,083	1,066	1,061	1,032	1,028
μ (kV)	1,233	1,118	1,087	1,058	1,038	1,033	1,023	1,016
σ (kV)	0,033	0,028	0,030	0,026	0,027	0,026	0,025	0,015
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
v (%)	2,701	2,466	2,731	2,490	2,585	2,539	2,436	1,465

Tab. 5 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,04 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,234	1,148	1,095	1,061	1,093	1,024	1,011	1,008
2. hodnota	1,277	1,223	1,139	1,109	1,054	1,082	1,059	1,019
3. hodnota	1,296	1,194	1,077	1,104	1,015	1,018	1,017	1,013
4. hodnota	1,333	1,139	1,076	1,045	1,073	1,019	1,066	1,052
5. hodnota	1,271	1,153	1,138	1,058	1,033	1,063	1,018	1,042
Max (kV)	1,333	1,223	1,139	1,109	1,093	1,082	1,066	1,052
Min (kV)	1,234	1,139	1,076	1,045	1,015	1,018	1,011	1,008
R (kV)	0,099	0,084	0,063	0,064	0,078	0,064	0,055	0,044
Me (kV)	1,277	1,153	1,095	1,061	1,054	1,024	1,018	1,019
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,271	1,148	1,077	1,058	1,033	1,019	1,017	1,013
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,296	1,194	1,138	1,104	1,073	1,063	1,059	1,042
μ (kV)	1,282	1,171	1,105	1,075	1,054	1,041	1,034	1,027
σ (kV)	0,032	0,032	0,028	0,026	0,028	0,026	0,023	0,017
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
v (%)	2,526	2,729	2,550	2,418	2,631	2,529	2,256	1,670

Tab. 6 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,05 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,367	1,223	1,111	1,082	1,116	1,063	1,037	1,066
2. hodnota	1,292	1,242	1,179	1,066	1,091	1,029	1,066	1,018
3. hodnota	1,317	1,232	1,154	1,134	1,047	1,091	1,012	1,029
4. hodnota	1,376	1,163	1,112	1,059	1,044	1,026	1,081	1,024
5. hodnota	1,312	1,181	1,124	1,121	1,059	1,082	1,029	1,055
Max (kV)	1,376	1,242	1,179	1,134	1,116	1,091	1,081	1,066
Min (kV)	1,292	1,163	1,111	1,059	1,044	1,026	1,012	1,018
R (kV)	0,084	0,079	0,068	0,075	0,072	0,065	0,069	0,048
Me (kV)	1,317	1,223	1,124	1,082	1,059	1,063	1,037	1,029
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,312	1,181	1,112	1,066	1,047	1,029	1,029	1,024
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,367	1,232	1,154	1,121	1,091	1,082	1,066	1,055
μ (kV)	1,333	1,208	1,136	1,092	1,071	1,058	1,045	1,038
σ (kV)	0,033	0,031	0,027	0,030	0,028	0,027	0,025	0,019
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
v (%)	2,462	2,541	2,335	2,737	2,598	2,520	2,400	1,801

Tab. 7 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,06 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,371	1,214	1,226	1,135	1,096	1,057	1,083	1,076
2. hodnota	1,429	1,312	1,161	1,121	1,094	1,103	1,038	1,022
3. hodnota	1,443	1,245	1,154	1,108	1,051	1,041	1,082	1,065
4. hodnota	1,368	1,283	1,219	1,169	1,126	1,096	1,025	1,024
5. hodnota	1,362	1,254	1,175	1,076	1,059	1,041	1,022	1,021
Max (kV)	1,443	1,312	1,226	1,169	1,126	1,103	1,083	1,076
Min (kV)	1,362	1,214	1,154	1,076	1,051	1,041	1,022	1,021
R (kV)	0,081	0,098	0,072	0,093	0,075	0,062	0,061	0,055
Me (kV)	1,371	1,254	1,175	1,121	1,094	1,057	1,038	1,024
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,368	1,245	1,161	1,108	1,059	1,041	1,025	1,022
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,429	1,283	1,219	1,135	1,096	1,096	1,082	1,065
μ (kV)	1,395	1,262	1,187	1,122	1,085	1,068	1,050	1,042
σ (kV)	0,034	0,033	0,030	0,031	0,027	0,027	0,027	0,024
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,453	2,652	2,514	2,730	2,512	2,509	2,579	2,292

Tab. 8 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,07 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,492	1,318	1,213	1,132	1,082	1,056	1,102	1,099
2. hodnota	1,413	1,254	1,247	1,143	1,072	1,054	1,074	1,029
3. hodnota	1,393	1,251	1,162	1,116	1,068	1,102	1,058	1,031
4. hodnota	1,487	1,299	1,189	1,134	1,136	1,116	1,047	1,037
5. hodnota	1,436	1,336	1,223	1,199	1,125	1,051	1,021	1,072
Max (kV)	1,492	1,336	1,247	1,199	1,136	1,116	1,102	1,099
Min (kV)	1,393	1,251	1,162	1,116	1,068	1,051	1,021	1,029
R (kV)	0,099	0,085	0,085	0,083	0,068	0,065	0,081	0,070
Me (kV)	1,436	1,299	1,213	1,134	1,082	1,056	1,058	1,037
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,413	1,254	1,189	1,132	1,072	1,054	1,047	1,031
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,487	1,318	1,223	1,143	1,125	1,102	1,074	1,072
μ (kV)	1,444	1,292	1,207	1,145	1,097	1,076	1,060	1,054
σ (kV)	0,039	0,034	0,029	0,028	0,028	0,028	0,027	0,028
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,731	2,634	2,413	2,486	2,578	2,557	2,549	2,614

Tab. 9 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,08 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,456	1,302	1,276	1,142	1,094	1,072	1,063	1,043
2. hodnota	1,531	1,389	1,293	1,178	1,175	1,139	1,048	1,102
3. hodnota	1,535	1,305	1,211	1,201	1,142	1,071	1,098	1,101
4. hodnota	1,469	1,312	1,219	1,154	1,124	1,123	1,052	1,039
5. hodnota	1,452	1,361	1,221	1,221	1,106	1,087	1,115	1,041
Max (kV)	1,535	1,389	1,293	1,221	1,175	1,139	1,115	1,102
Min (kV)	1,452	1,302	1,211	1,142	1,094	1,071	1,048	1,039
R (kV)	0,083	0,087	0,082	0,079	0,081	0,068	0,067	0,063
Me (kV)	1,469	1,312	1,221	1,178	1,124	1,087	1,063	1,043
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,456	1,305	1,219	1,154	1,106	1,072	1,052	1,041
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,531	1,361	1,276	1,201	1,142	1,123	1,098	1,101
μ (kV)	1,489	1,334	1,244	1,179	1,128	1,098	1,075	1,065
σ (kV)	0,037	0,035	0,034	0,029	0,028	0,028	0,027	0,030
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,466	2,619	2,707	2,470	2,526	2,520	2,472	2,785

Tab. 10 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,09 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,518	1,395	1,296	1,176	1,189	1,127	1,071	1,106
2. hodnota	1,573	1,325	1,229	1,218	1,122	1,156	1,125	1,043
3. hodnota	1,517	1,406	1,314	1,263	1,187	1,084	1,064	1,114
4. hodnota	1,592	1,394	1,242	1,221	1,124	1,085	1,122	1,059
5. hodnota	1,476	1,333	1,298	1,191	1,168	1,142	1,069	1,065
Max (kV)	1,592	1,406	1,314	1,263	1,189	1,156	1,125	1,114
Min (kV)	1,476	1,325	1,229	1,176	1,122	1,084	1,064	1,043
R (kV)	0,116	0,081	0,085	0,087	0,067	0,072	0,061	0,071
Me (kV)	1,518	1,394	1,296	1,218	1,168	1,127	1,071	1,065
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,517	1,333	1,242	1,191	1,124	1,085	1,069	1,059
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,573	1,395	1,298	1,221	1,187	1,142	1,122	1,106
μ (kV)	1,535	1,371	1,276	1,214	1,158	1,119	1,090	1,077
σ (kV)	0,042	0,034	0,034	0,030	0,030	0,029	0,027	0,028
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,731	2,504	2,645	2,455	2,548	2,634	2,504	2,570

Tab. 11 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,1 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,615	1,461	1,299	1,239	1,181	1,093	1,094	1,076
2. hodnota	1,542	1,456	1,352	1,307	1,229	1,128	1,082	1,126
3. hodnota	1,561	1,404	1,356	1,298	1,149	1,168	1,148	1,089
4. hodnota	1,647	1,379	1,281	1,223	1,212	1,127	1,095	1,062
5. hodnota	1,624	1,477	1,287	1,241	1,151	1,159	1,152	1,129
Max (kV)	1,647	1,477	1,356	1,307	1,229	1,168	1,152	1,129
Min (kV)	1,542	1,379	1,281	1,223	1,149	1,093	1,082	1,062
R (kV)	0,105	0,098	0,075	0,084	0,080	0,075	0,070	0,067
Me (kV)	1,615	1,456	1,299	1,241	1,181	1,128	1,095	1,089
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,561	1,404	1,287	1,239	1,151	1,127	1,094	1,076
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,624	1,461	1,352	1,298	1,212	1,159	1,148	1,126
μ (kV)	1,598	1,435	1,315	1,262	1,184	1,135	1,114	1,096
σ (kV)	0,040	0,037	0,032	0,034	0,032	0,027	0,030	0,027
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,483	2,602	2,463	2,702	2,705	2,345	2,658	2,445

Tab. 12 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,2 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,663	1,487	1,382	1,259	1,234	1,142	1,109	1,141
2. hodnota	1,621	1,492	1,318	1,253	1,243	1,181	1,158	1,071
3. hodnota	1,584	1,409	1,342	1,262	1,187	1,124	1,152	1,079
4. hodnota	1,604	1,484	1,414	1,336	1,152	1,188	1,085	1,131
5. hodnota	1,701	1,417	1,343	1,308	1,223	1,125	1,106	1,094
Max (kV)	1,701	1,492	1,414	1,336	1,243	1,188	1,158	1,141
Min (kV)	1,584	1,409	1,318	1,253	1,152	1,124	1,085	1,071
R (kV)	0,117	0,083	0,096	0,083	0,091	0,064	0,073	0,070
Me (kV)	1,621	1,484	1,343	1,262	1,223	1,142	1,109	1,094
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,604	1,417	1,342	1,259	1,187	1,125	1,106	1,079
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,663	1,487	1,382	1,308	1,234	1,181	1,152	1,131
μ (kV)	1,635	1,458	1,360	1,284	1,208	1,152	1,122	1,103
σ (kV)	0,042	0,037	0,034	0,033	0,034	0,027	0,028	0,028
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,581	2,521	2,500	2,548	2,796	2,377	2,518	2,534



Tab. 13 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,25 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,612	1,489	1,375	1,342	1,212	1,208	1,145	1,128
2. hodnota	1,671	1,459	1,331	1,304	1,205	1,143	1,142	1,071
3. hodnota	1,684	1,424	1,397	1,271	1,275	1,122	1,163	1,123
4. hodnota	1,636	1,497	1,438	1,263	1,263	1,186	1,108	1,086
5. hodnota	1,733	1,536	1,429	1,339	1,201	1,187	1,087	1,147
Max (kV)	1,733	1,536	1,438	1,342	1,275	1,208	1,163	1,147
Min (kV)	1,612	1,424	1,331	1,263	1,201	1,122	1,087	1,071
R (kV)	0,121	0,112	0,107	0,079	0,074	0,086	0,076	0,076
Me (kV)	1,671	1,489	1,397	1,304	1,212	1,186	1,142	1,123
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,636	1,459	1,375	1,271	1,205	1,143	1,108	1,086
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,684	1,497	1,429	1,339	1,263	1,187	1,145	1,128
μ (kV)	1,667	1,481	1,394	1,304	1,231	1,169	1,129	1,111
σ (kV)	0,042	0,038	0,039	0,033	0,031	0,032	0,028	0,028
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,494	2,540	2,778	2,530	2,542	2,710	2,437	2,531

Tab. 14 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,3 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,582	1,491	1,401	1,306	1,174	1,161	1,118	1,074
2. hodnota	1,567	1,498	1,381	1,296	1,243	1,139	1,164	1,126
3. hodnota	1,612	1,414	1,324	1,268	1,219	1,194	1,093	1,095
4. hodnota	1,688	1,401	1,323	1,349	1,274	1,186	1,079	1,038
5. hodnota	1,560	1,499	1,428	1,243	1,185	1,103	1,149	1,112
Max (kV)	1,688	1,499	1,428	1,349	1,274	1,194	1,164	1,126
Min (kV)	1,560	1,401	1,323	1,243	1,174	1,103	1,079	1,038
R (kV)	0,128	0,098	0,105	0,106	0,100	0,091	0,085	0,088
Me (kV)	1,582	1,491	1,381	1,296	1,219	1,161	1,118	1,095
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,567	1,414	1,324	1,268	1,185	1,139	1,093	1,074
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,612	1,498	1,401	1,306	1,243	1,186	1,149	1,112
μ (kV)	1,602	1,461	1,371	1,292	1,219	1,157	1,121	1,089
σ (kV)	0,047	0,044	0,042	0,036	0,037	0,033	0,032	0,031
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	2,913	2,988	3,052	2,776	3,021	2,858	2,875	2,833

Tab. 15 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,4 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,537	1,387	1,376	1,244	1,235	1,167	1,039	1,022
2. hodnota	1,576	1,434	1,265	1,171	1,174	1,075	1,112	1,024
3. hodnota	1,455	1,439	1,352	1,249	1,127	1,149	1,041	1,047
4. hodnota	1,566	1,321	1,294	1,265	1,212	1,091	1,073	1,109
5. hodnota	1,485	1,379	1,349	1,279	1,196	1,122	1,116	1,067
Max (kV)	1,576	1,439	1,376	1,279	1,235	1,167	1,116	1,109
Min (kV)	1,455	1,321	1,265	1,171	1,127	1,075	1,039	1,022
R (kV)	0,121	0,118	0,111	0,108	0,108	0,092	0,077	0,087
Me (kV)	1,537	1,387	1,349	1,249	1,196	1,122	1,073	1,047
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,485	1,379	1,294	1,244	1,174	1,091	1,041	1,024
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,566	1,434	1,352	1,265	1,212	1,149	1,112	1,067
μ (kV)	1,524	1,392	1,327	1,242	1,189	1,121	1,076	1,054
σ (kV)	0,047	0,043	0,041	0,037	0,037	0,034	0,033	0,032
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	3,067	3,083	3,096	3,012	3,094	3,069	3,081	3,050

Tab. 16 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,5 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,472	1,276	1,295	1,153	1,105	1,116	1,041	1,027
2. hodnota	1,366	1,362	1,232	1,155	1,196	1,099	1,032	1,016
3. hodnota	1,418	1,305	1,201	1,238	1,106	1,048	1,095	1,089
4. hodnota	1,447	1,277	1,299	1,143	1,124	1,067	1,109	1,013
5. hodnota	1,499	1,375	1,218	1,217	1,164	1,144	1,028	1,077
Max (kV)	1,499	1,375	1,299	1,238	1,196	1,144	1,109	1,089
Min (kV)	1,366	1,276	1,201	1,143	1,105	1,048	1,028	1,013
R (kV)	0,133	0,099	0,098	0,095	0,091	0,096	0,081	0,076
Me (kV)	1,447	1,305	1,232	1,155	1,124	1,099	1,041	1,027
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,418	1,277	1,218	1,153	1,106	1,067	1,032	1,016
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,472	1,362	1,295	1,217	1,164	1,116	1,095	1,077
μ (kV)	1,440	1,319	1,249	1,181	1,139	1,095	1,061	1,044
σ (kV)	0,046	0,042	0,040	0,039	0,036	0,034	0,034	0,032
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
v (%)	3,183	3,180	3,236	3,268	3,127	3,125	3,207	3,072

Tab. 17 Základní statistické veličiny polarizačního indexu fluidního systému I s obsahem nanopřísad I (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,198	1,068	1,147	1,128	1,036	1,093	1,000	1,033
2. hodnota	1,280	1,222	1,196	1,154	1,102	1,002	1,099	1,002
3. hodnota	1,234	1,185	1,073	1,027	1,004	1,001	1,032	1,001
4. hodnota	1,129	1,107	1,051	1,053	1,134	1,000	1,000	1,034
5. hodnota	1,141	1,151	1,144	1,034	1,019	1,090	1,001	1,000
Max (kV)	1,280	1,222	1,196	1,154	1,134	1,093	1,099	1,034
Min (kV)	1,129	1,068	1,051	1,027	1,004	1,000	1,000	1,000
R (kV)	0,151	0,154	0,145	0,127	0,130	0,093	0,099	0,034
Me (kV)	1,198	1,151	1,144	1,053	1,036	1,002	1,001	1,002
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,141	1,107	1,073	1,034	1,019	1,001	1,000	1,001
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,234	1,185	1,147	1,128	1,102	1,090	1,032	1,033
μ (kV)	1,196	1,147	1,122	1,079	1,059	1,037	1,026	1,014
σ (kV)	0,057	0,055	0,053	0,052	0,050	0,044	0,038	0,016
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,001	0,000
v (%)	4,731	4,765	4,720	4,802	4,746	4,276	3,733	1,572

Tab. 18 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému s obsahem nanopřísad 0 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,097E+11	8,897E+10	6,395E+10	3,704E+10	2,439E+10	1,873E+10	1,210E+10	8,850E+09
2. hodnota	1,095E+11	8,721E+10	6,313E+10	3,988E+10	2,438E+10	1,940E+10	1,240E+10	8,920E+09
3. hodnota	1,130E+11	8,568E+10	6,059E+10	3,827E+10	2,419E+10	1,798E+10	1,290E+10	8,490E+09
4. hodnota	1,094E+11	8,729E+10	6,033E+10	3,751E+10	2,522E+10	1,887E+10	1,291E+10	8,530E+09
5. hodnota	1,041E+11	8,223E+10	6,073E+10	3,876E+10	2,335E+10	1,914E+10	1,281E+10	9,060E+09
Max (kV)	1,130E+11	8,897E+10	6,395E+10	3,988E+10	2,522E+10	1,940E+10	1,291E+10	9,060E+09
Min (kV)	1,041E+11	8,223E+10	6,033E+10	3,704E+10	2,335E+10	1,798E+10	1,210E+10	8,490E+09
R (kV)	8,900E+09	6,740E+09	3,620E+09	2,840E+09	1,870E+09	1,420E+09	8,100E+08	5,700E+08
Me (kV)	1,095E+11	8,721E+10	6,073E+10	3,827E+10	2,438E+10	1,887E+10	1,281E+10	8,850E+09
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,094E+11	8,568E+10	6,059E+10	3,751E+10	2,419E+10	1,873E+10	1,240E+10	8,530E+09
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,097E+11	8,729E+10	6,313E+10	3,876E+10	2,439E+10	1,914E+10	1,290E+10	8,920E+09
μ (kV)	1,091E+11	8,628E+10	6,175E+10	3,829E+10	2,431E+10	1,882E+10	1,262E+10	8,770E+09
σ (kV)	2,858E+09	2,275E+09	1,493E+09	9,920E+08	5,959E+08	4,806E+08	3,217E+08	2,232E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	8,165E+18	5,177E+18	2,229E+18	9,841E+17	3,551E+17	2,310E+17	1,035E+17	4,980E+16
v (%)	2,618	2,637	2,418	2,591	2,452	2,553	2,548	2,545

Tab. 19 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,01 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,196E+11	1,063E+11	7,009E+10	4,814E+10	3,477E+10	2,098E+10	1,563E+10	1,214E+10
2. hodnota	1,155E+11	1,050E+11	6,973E+10	5,127E+10	3,400E+10	2,145E+10	1,575E+10	1,242E+10
3. hodnota	1,179E+11	1,016E+11	7,328E+10	5,136E+10	3,324E+10	2,229E+10	1,492E+10	1,205E+10
4. hodnota	1,219E+11	1,026E+11	7,392E+10	4,955E+10	3,595E+10	2,208E+10	1,608E+10	1,221E+10
5. hodnota	1,244E+11	1,091E+11	7,005E+10	5,076E+10	3,401E+10	2,242E+10	1,531E+10	1,292E+10
Max (kV)	1,199E+11	1,049E+11	7,141E+10	5,022E+10	3,439E+10	2,184E+10	1,554E+10	1,235E+10
Min (kV)	1,155E+11	1,016E+11	6,973E+10	4,814E+10	3,324E+10	2,098E+10	1,492E+10	1,205E+10
R (kV)	4,430E+09	3,310E+09	1,680E+09	2,080E+09	1,150E+09	8,600E+08	6,200E+08	3,000E+08
Me (kV)	1,196E+11	1,050E+11	7,009E+10	5,076E+10	3,401E+10	2,208E+10	1,563E+10	1,221E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,179E+11	1,026E+11	7,005E+10	4,955E+10	3,400E+10	2,145E+10	1,531E+10	1,214E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,219E+11	1,063E+11	7,328E+10	5,127E+10	3,477E+10	2,229E+10	1,575E+10	1,242E+10
μ (kV)	1,199E+11	1,049E+11	7,141E+10	5,022E+10	3,439E+10	2,184E+10	1,554E+10	1,235E+10
σ (kV)	3,098E+09	2,667E+09	1,801E+09	1,222E+09	9,162E+08	5,455E+08	3,952E+08	3,110E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	9,598E+18	7,113E+18	3,242E+18	1,494E+18	8,394E+17	2,976E+17	1,562E+17	9,670E+16
v (%)	2,585	2,542	2,521	2,434	2,664	2,497	2,544	2,518

Tab. 20 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,02 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,272E+11	1,187E+11	7,575E+10	5,382E+10	3,632E+10	2,275E+10	1,519E+10	1,387E+10
2. hodnota	1,282E+11	1,133E+11	7,908E+10	5,156E+10	3,411E+10	2,271E+10	1,621E+10	1,376E+10
3. hodnota	1,224E+11	1,149E+11	7,626E+10	5,091E+10	3,611E+10	2,249E+10	1,643E+10	1,394E+10
4. hodnota	1,283E+11	1,175E+11	8,082E+10	5,131E+10	3,445E+10	2,404E+10	1,598E+10	1,395E+10
5. hodnota	1,206E+11	1,108E+11	8,018E+10	5,412E+10	3,505E+10	2,361E+10	1,610E+10	1,303E+10
Max (kV)	1,283E+11	1,187E+11	8,082E+10	5,412E+10	3,632E+10	2,404E+10	1,643E+10	1,395E+10
Min (kV)	1,206E+11	1,108E+11	7,575E+10	5,091E+10	3,411E+10	2,249E+10	1,519E+10	1,303E+10
R (kV)	7,630E+09	7,930E+09	5,070E+09	3,210E+09	2,210E+09	1,550E+09	1,240E+09	9,200E+08
Me (kV)	1,272E+11	1,149E+11	7,908E+10	5,156E+10	3,505E+10	2,275E+10	1,610E+10	1,387E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,224E+11	1,133E+11	7,626E+10	5,131E+10	3,445E+10	2,271E+10	1,598E+10	1,376E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,282E+11	1,175E+11	8,018E+10	5,382E+10	3,611E+10	2,361E+10	1,621E+10	1,394E+10
μ (kV)	1,253E+11	1,150E+11	7,842E+10	5,234E+10	3,521E+10	2,312E+10	1,598E+10	1,371E+10
σ (kV)	3,192E+09	2,860E+09	2,054E+09	1,347E+09	8,781E+08	5,981E+08	4,228E+08	3,467E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	1,019E+19	8,182E+18	4,218E+18	1,815E+18	7,711E+17	3,577E+17	1,788E+17	1,202E+17
v (%)	2,547	2,486	2,619	2,573	2,494	2,587	2,646	2,529

Tab. 21 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,03 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,405E+11	1,201E+11	8,841E+10	5,660E+10	3,729E+10	2,604E+10	1,805E+10	1,609E+10
2. hodnota	1,332E+11	1,167E+11	8,323E+10	5,950E+10	3,601E+10	2,581E+10	1,823E+10	1,497E+10
3. hodnota	1,330E+11	1,182E+11	8,406E+10	5,620E+10	3,653E+10	2,505E+10	1,802E+10	1,535E+10
4. hodnota	1,342E+11	1,138E+11	8,798E+10	5,590E+10	3,822E+10	2,511E+10	1,752E+10	1,529E+10
5. hodnota	1,298E+11	1,120E+11	8,414E+10	5,880E+10	3,841E+10	2,702E+10	1,906E+10	1,528E+10
Max (kV)	1,405E+11	1,201E+11	8,841E+10	5,950E+10	3,841E+10	2,702E+10	1,906E+10	1,609E+10
Min (kV)	1,298E+11	1,120E+11	8,323E+10	5,590E+10	3,601E+10	2,505E+10	1,752E+10	1,497E+10
R (kV)	1,068E+10	8,080E+09	5,180E+09	3,600E+09	2,400E+09	1,970E+09	1,540E+09	1,120E+09
Me (kV)	1,332E+11	1,167E+11	8,414E+10	5,660E+10	3,729E+10	2,581E+10	1,805E+10	1,529E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,330E+11	1,138E+11	8,406E+10	5,620E+10	3,653E+10	2,511E+10	1,802E+10	1,528E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,342E+11	1,182E+11	8,798E+10	5,880E+10	3,822E+10	2,604E+10	1,823E+10	1,535E+10
μ (kV)	1,341E+11	1,162E+11	8,556E+10	5,740E+10	3,729E+10	2,581E+10	1,818E+10	1,540E+10
σ (kV)	3,499E+09	2,928E+09	2,176E+09	1,463E+09	9,312E+08	7,190E+08	5,010E+08	3,715E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	1,225E+19	8,572E+18	4,735E+18	2,140E+18	8,671E+17	5,169E+17	2,510E+17	1,380E+17
v (%)	2,609	2,520	2,543	2,549	2,497	2,786	2,756	2,413

Tab. 22 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,04 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	1,881E+11	1,733E+11	1,245E+11	9,149E+10	5,068E+10	3,345E+10	2,103E+10	1,663E+10
2. hodnota	1,979E+11	1,784E+11	1,294E+11	8,701E+10	4,920E+10	3,321E+10	2,003E+10	1,617E+10
3. hodnota	1,919E+11	1,806E+11	1,293E+11	8,605E+10	5,193E+10	3,165E+10	2,041E+10	1,699E+10
4. hodnota	1,976E+11	1,799E+11	1,345E+11	8,912E+10	5,229E+10	3,218E+10	1,946E+10	1,581E+10
5. hodnota	2,021E+11	1,872E+11	1,294E+11	9,193E+10	4,931E+10	3,111E+10	2,032E+10	1,612E+10
Max (kV)	2,021E+11	1,872E+11	1,345E+11	9,193E+10	5,229E+10	3,345E+10	2,103E+10	1,699E+10
Min (kV)	1,881E+11	1,733E+11	1,245E+11	8,605E+10	4,920E+10	3,111E+10	1,946E+10	1,581E+10
R (kV)	1,402E+10	1,388E+10	1,000E+10	5,880E+09	3,090E+09	2,338E+09	1,570E+09	1,180E+09
Me (kV)	1,976E+11	1,799E+11	1,294E+11	8,912E+10	5,068E+10	3,218E+10	2,032E+10	1,617E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	1,919E+11	1,784E+11	1,293E+11	8,701E+10	4,931E+10	3,165E+10	2,003E+10	1,612E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	1,979E+11	1,806E+11	1,294E+11	9,149E+10	5,193E+10	3,321E+10	2,041E+10	1,663E+10
μ (kV)	1,955E+11	1,799E+11	1,294E+11	8,912E+10	5,068E+10	3,232E+10	2,025E+10	1,634E+10
σ (kV)	4,944E+09	4,453E+09	3,163E+09	2,341E+09	1,282E+09	8,941E+08	5,121E+08	4,159E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	2,445E+19	1,983E+19	1,000E+19	5,478E+18	1,644E+18	7,994E+17	2,623E+17	1,729E+17
v (%)	2,529	2,476	2,444	2,626	2,530	2,766	2,529	2,544



Tab. 23 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,05 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	2,581E+11	2,484E+11	1,785E+11	1,243E+11	7,088E+10	4,692E+10	2,862E+10	2,065E+10
2. hodnota	2,635E+11	2,512E+11	1,886E+11	1,191E+11	7,003E+10	4,689E+10	2,897E+10	1,901E+10
3. hodnota	2,719E+11	2,599E+11	1,792E+11	1,190E+11	7,387E+10	4,476E+10	2,876E+10	1,969E+10
4. hodnota	2,534E+11	2,468E+11	1,801E+11	1,191E+11	7,101E+10	4,681E+10	3,021E+10	1,993E+10
5. hodnota	2,685E+11	2,625E+11	1,901E+11	1,141E+11	7,430E+10	4,421E+10	3,036E+10	1,981E+10
Max (kV)	2,719E+11	2,625E+11	1,901E+11	1,243E+11	7,430E+10	4,692E+10	3,036E+10	2,065E+10
Min (kV)	2,534E+11	2,468E+11	1,785E+11	1,141E+11	7,003E+10	4,421E+10	2,862E+10	1,901E+10
R (kV)	1,848E+10	1,575E+10	1,157E+10	1,027E+10	4,270E+09	2,710E+09	1,740E+09	1,640E+09
Me (kV)	2,635E+11	2,512E+11	1,801E+11	1,191E+11	7,101E+10	4,681E+10	2,897E+10	1,981E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,581E+11	2,484E+11	1,792E+11	1,190E+11	7,088E+10	4,476E+10	2,876E+10	1,969E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	2,685E+11	2,599E+11	1,886E+11	1,191E+11	7,387E+10	4,689E+10	3,021E+10	1,993E+10
μ (kV)	2,631E+11	2,538E+11	1,833E+11	1,191E+11	7,202E+10	4,592E+10	2,938E+10	1,982E+10
σ (kV)	6,724E+09	6,306E+09	4,983E+09	3,249E+09	1,726E+09	1,183E+09	7,456E+08	5,242E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	4,521E+19	3,977E+19	2,483E+19	1,055E+19	2,980E+18	1,401E+18	5,559E+17	2,748E+17
v (%)	2,556	2,485	2,719	2,728	2,397	2,577	2,537	2,645

Tab. 24 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,06 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,695E+11	3,232E+11	2,235E+11	1,424E+11	8,054E+10	5,531E+10	4,105E+10	2,503E+10
2. hodnota	3,711E+11	3,316E+11	2,224E+11	1,505E+11	8,263E+10	5,599E+10	4,287E+10	2,482E+10
3. hodnota	3,899E+11	3,165E+11	2,306E+11	1,432E+11	8,491E+10	5,793E+10	4,381E+10	2,356E+10
4. hodnota	3,916E+11	3,334E+11	2,170E+11	1,382E+11	8,246E+10	5,322E+10	4,276E+10	2,367E+10
5. hodnota	3,820E+11	3,118E+11	2,144E+11	1,432E+11	8,603E+10	5,623E+10	4,111E+10	2,373E+10
Max (kV)	3,916E+11	3,334E+11	2,306E+11	1,505E+11	8,603E+10	5,793E+10	4,381E+10	2,503E+10
Min (kV)	3,695E+11	3,118E+11	2,144E+11	1,382E+11	8,054E+10	5,322E+10	4,105E+10	2,356E+10
R (kV)	2,215E+10	2,157E+10	1,619E+10	1,227E+10	5,490E+09	4,710E+09	2,760E+09	1,470E+09
Me (kV)	3,820E+11	3,232E+11	2,224E+11	1,432E+11	8,263E+10	5,599E+10	4,276E+10	2,373E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,711E+11	3,165E+11	2,170E+11	1,424E+11	8,246E+10	5,531E+10	4,111E+10	2,367E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,899E+11	3,316E+11	2,235E+11	1,432E+11	8,491E+10	5,623E+10	4,287E+10	2,482E+10
μ (kV)	3,808E+11	3,233E+11	2,216E+11	1,435E+11	8,331E+10	5,574E+10	4,232E+10	2,416E+10
σ (kV)	9,201E+09	8,339E+09	5,628E+09	3,955E+09	1,940E+09	1,525E+09	1,076E+09	6,289E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	8,466E+19	6,954E+19	3,168E+19	1,564E+19	3,763E+18	2,327E+18	1,159E+18	3,955E+17
v (%)	2,416	2,579	2,540	2,756	2,328	2,737	2,543	2,603

Tab. 25 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,07 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	4,397E+11	3,757E+11	2,882E+11	1,782E+11	1,077E+11	5,993E+10	4,881E+10	2,952E+10
2. hodnota	4,437E+11	3,896E+11	2,823E+11	1,893E+11	1,015E+11	5,642E+10	5,083E+10	3,136E+10
3. hodnota	4,657E+11	3,974E+11	2,701E+11	1,890E+11	1,007E+11	5,981E+10	5,147E+10	3,099E+10
4. hodnota	4,627E+11	3,939E+11	2,703E+11	1,834E+11	1,018E+11	5,967E+10	4,816E+10	3,022E+10
5. hodnota	4,396E+11	3,763E+11	2,704E+11	1,795E+11	1,001E+11	5,736E+10	5,056E+10	2,937E+10
Max (kV)	4,657E+11	3,974E+11	2,882E+11	1,893E+11	1,077E+11	5,993E+10	5,147E+10	3,136E+10
Min (kV)	4,396E+11	3,757E+11	2,701E+11	1,782E+11	1,001E+11	5,642E+10	4,816E+10	2,937E+10
R (kV)	2,611E+10	2,166E+10	1,805E+10	1,113E+10	7,610E+09	3,510E+09	3,310E+09	1,990E+09
Me (kV)	4,437E+11	3,896E+11	2,704E+11	1,834E+11	1,015E+11	5,967E+10	5,056E+10	3,022E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	4,397E+11	3,763E+11	2,703E+11	1,795E+11	1,007E+11	5,736E+10	4,881E+10	2,952E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	4,627E+11	3,939E+11	2,823E+11	1,890E+11	1,018E+11	5,981E+10	5,083E+10	3,099E+10
μ (kV)	4,503E+11	3,866E+11	2,763E+11	1,839E+11	1,024E+11	5,864E+10	4,997E+10	3,029E+10
σ (kV)	1,150E+10	8,974E+09	7,566E+09	4,634E+09	2,738E+09	1,460E+09	1,262E+09	7,847E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	1,322E+20	8,053E+19	5,725E+19	2,147E+19	7,499E+18	2,132E+18	1,592E+18	6,158E+17
v (%)	2,554	2,321	2,739	2,520	2,675	2,490	2,525	2,591

Tab. 26 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,08 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	4,841E+11	4,542E+11	2,938E+11	1,941E+11	1,097E+11	6,146E+10	5,602E+10	3,624E+10
2. hodnota	5,035E+11	4,522E+11	2,732E+11	1,890E+11	1,042E+11	6,599E+10	5,439E+10	3,652E+10
3. hodnota	5,097E+11	4,311E+11	2,783E+11	1,801E+11	1,082E+11	6,377E+10	5,493E+10	3,488E+10
4. hodnota	4,810E+11	4,303E+11	2,909E+11	1,837E+11	1,121E+11	6,589E+10	5,789E+10	3,408E+10
5. hodnota	4,805E+11	4,297E+11	2,896E+11	1,850E+11	1,102E+11	6,299E+10	5,763E+10	3,503E+10
Max (kV)	5,097E+11	4,542E+11	2,938E+11	1,941E+11	1,121E+11	6,599E+10	5,789E+10	3,652E+10
Min (kV)	4,805E+11	4,297E+11	2,732E+11	1,801E+11	1,042E+11	6,146E+10	5,439E+10	3,408E+10
R (kV)	2,927E+10	2,446E+10	2,062E+10	1,399E+10	7,900E+09	4,528E+09	3,502E+09	2,440E+09
Me (kV)	4,841E+11	4,311E+11	2,896E+11	1,850E+11	1,097E+11	6,377E+10	5,602E+10	3,503E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	4,810E+11	4,303E+11	2,783E+11	1,837E+11	1,082E+11	6,299E+10	5,493E+10	3,488E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	5,035E+11	4,522E+11	2,909E+11	1,890E+11	1,102E+11	6,589E+10	5,763E+10	3,624E+10
μ (kV)	4,918E+11	4,395E+11	2,852E+11	1,864E+11	1,089E+11	6,402E+10	5,617E+10	3,535E+10
σ (kV)	1,236E+10	1,120E+10	7,978E+09	4,793E+09	2,651E+09	1,735E+09	1,402E+09	9,052E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	1,527E+20	1,254E+20	6,366E+19	2,297E+19	7,030E+18	3,012E+18	1,967E+18	8,194E+17
v (%)	2,513	2,548	2,798	2,571	2,435	2,711	2,497	2,561

Tab. 27 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,09 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	5,486E+11	5,017E+11	3,002E+11	2,001E+11	1,092E+11	6,740E+10	5,961E+10	3,728E+10
2. hodnota	5,468E+11	5,093E+11	3,023E+11	1,969E+11	1,093E+11	6,581E+10	5,757E+10	3,727E+10
3. hodnota	5,318E+11	4,986E+11	3,002E+11	1,987E+11	1,096E+11	6,695E+10	5,812E+10	3,912E+10
4. hodnota	5,163E+11	4,767E+11	2,824E+11	1,950E+11	1,163E+11	6,393E+10	5,612E+10	3,834E+10
5. hodnota	5,236E+11	4,756E+11	2,936E+11	2,106E+11	1,133E+11	6,286E+10	6,038E+10	3,643E+10
Max (kV)	5,486E+11	5,093E+11	3,023E+11	2,106E+11	1,163E+11	6,740E+10	6,038E+10	3,912E+10
Min (kV)	5,163E+11	4,756E+11	2,824E+11	1,950E+11	1,092E+11	6,286E+10	5,612E+10	3,643E+10
R (kV)	3,234E+10	3,363E+10	1,996E+10	1,554E+10	7,080E+09	4,540E+09	4,260E+09	2,690E+09
Me (kV)	5,318E+11	4,986E+11	3,002E+11	1,987E+11	1,096E+11	6,581E+10	5,812E+10	3,728E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	5,236E+11	4,767E+11	2,936E+11	1,969E+11	1,093E+11	6,393E+10	5,757E+10	3,727E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	5,468E+11	5,017E+11	3,002E+11	2,001E+11	1,133E+11	6,695E+10	5,961E+10	3,834E+10
μ (kV)	5,334E+11	4,924E+11	2,957E+11	2,002E+11	1,115E+11	6,539E+10	5,836E+10	3,769E+10
σ (kV)	1,266E+10	1,368E+10	7,300E+09	5,434E+09	2,807E+09	1,743E+09	1,506E+09	9,380E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	1,604E+20	1,871E+20	5,329E+19	2,952E+19	7,878E+18	3,037E+18	2,268E+18	8,799E+17
v (%)	2,374	2,778	2,468	2,714	2,517	2,665	2,581	2,489

Tab. 28 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,1 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	6,195E+11	5,706E+11	3,328E+11	2,467E+11	1,528E+11	8,342E+10	6,391E+10	4,453E+10
2. hodnota	6,183E+11	5,675E+11	3,088E+11	2,389E+11	1,482E+11	7,863E+10	6,154E+10	4,315E+10
3. hodnota	5,976E+11	5,988E+11	3,254E+11	2,402E+11	1,583E+11	7,914E+10	6,033E+10	4,486E+10
4. hodnota	5,764E+11	6,032E+11	3,173E+11	2,537E+11	1,558E+11	8,231E+10	6,146E+10	4,205E+10
5. hodnota	6,062E+11	5,871E+11	3,188E+11	2,359E+11	1,487E+11	8,287E+10	6,488E+10	4,497E+10
Max (kV)	6,195E+11	6,032E+11	3,328E+11	2,537E+11	1,583E+11	8,342E+10	6,488E+10	4,497E+10
Min (kV)	5,764E+11	5,675E+11	3,088E+11	2,359E+11	1,482E+11	7,863E+10	6,033E+10	4,205E+10
R (kV)	4,309E+10	3,572E+10	2,398E+10	1,782E+10	1,010E+10	4,790E+09	4,550E+09	2,920E+09
Me (kV)	6,062E+11	5,871E+11	3,188E+11	2,402E+11	1,528E+11	8,231E+10	6,154E+10	4,453E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	5,976E+11	5,706E+11	3,173E+11	2,389E+11	1,487E+11	7,914E+10	6,146E+10	4,315E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	6,183E+11	5,988E+11	3,254E+11	2,467E+11	1,558E+11	8,287E+10	6,391E+10	4,486E+10
μ (kV)	6,036E+11	5,854E+11	3,206E+11	2,431E+11	1,528E+11	8,127E+10	6,242E+10	4,391E+10
σ (kV)	1,582E+10	1,440E+10	8,059E+09	6,383E+09	3,924E+09	1,988E+09	1,693E+09	1,136E+09
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	2,501E+20	2,075E+20	6,495E+19	4,074E+19	1,539E+19	3,954E+18	2,867E+18	1,290E+18
v (%)	2,620	2,461	2,514	2,626	2,569	2,447	2,713	2,586

Tab. 29 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,2 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	7,259E+11	5,982E+11	3,759E+11	2,585E+11	1,705E+11	1,346E+11	6,853E+10	4,532E+10
2. hodnota	6,902E+11	5,762E+11	3,985E+11	2,551E+11	1,703E+11	1,320E+11	6,929E+10	4,621E+10
3. hodnota	7,174E+11	5,986E+11	4,017E+11	2,708E+11	1,802E+11	1,287E+11	6,500E+10	4,687E+10
4. hodnota	6,838E+11	6,196E+11	3,843E+11	2,731E+11	1,803E+11	1,316E+11	6,637E+10	4,386E+10
5. hodnota	6,856E+11	6,179E+11	3,883E+11	2,697E+11	1,719E+11	1,252E+11	6,992E+10	4,693E+10
Max (kV)	7,259E+11	6,196E+11	4,017E+11	2,731E+11	1,803E+11	1,346E+11	6,992E+10	4,693E+10
Min (kV)	6,838E+11	5,762E+11	3,759E+11	2,551E+11	1,703E+11	1,252E+11	6,500E+10	4,386E+10
R (kV)	4,210E+10	4,339E+10	2,579E+10	1,803E+10	9,970E+09	9,400E+09	4,920E+09	3,070E+09
Me (kV)	6,902E+11	5,986E+11	3,883E+11	2,697E+11	1,719E+11	1,316E+11	6,853E+10	4,621E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	6,856E+11	5,982E+11	3,843E+11	2,585E+11	1,705E+11	1,287E+11	6,637E+10	4,532E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	7,174E+11	6,179E+11	3,985E+11	2,708E+11	1,802E+11	1,320E+11	6,929E+10	4,687E+10
μ (kV)	7,006E+11	6,021E+11	3,897E+11	2,654E+11	1,746E+11	1,304E+11	6,782E+10	4,584E+10
σ (kV)	1,755E+10	1,583E+10	9,409E+09	7,212E+09	4,606E+09	3,204E+09	1,851E+09	1,147E+09
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	3,082E+20	2,507E+20	8,852E+19	5,201E+19	2,121E+19	1,027E+19	3,426E+18	1,315E+18
v (%)	2,506	2,630	2,414	2,717	2,637	2,457	2,729	2,502

Tab. 30 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,25 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	7,593E+11	6,652E+11	4,493E+11	2,844E+11	1,783E+11	1,122E+11	6,981E+10	4,785E+10
2. hodnota	7,207E+11	6,547E+11	4,484E+11	2,701E+11	1,791E+11	1,119E+11	6,996E+10	4,719E+10
3. hodnota	7,321E+11	6,831E+11	4,257E+11	2,743E+11	1,779E+11	1,168E+11	7,093E+10	4,515E+10
4. hodnota	7,698E+11	6,382E+11	4,227E+11	2,901E+11	1,772E+11	1,164E+11	6,677E+10	4,520E+10
5. hodnota	7,259E+11	6,421E+11	4,288E+11	2,787E+11	1,893E+11	1,095E+11	6,622E+10	4,525E+10
Max (kV)	7,698E+11	6,831E+11	4,493E+11	2,901E+11	1,893E+11	1,168E+11	7,093E+10	4,785E+10
Min (kV)	7,207E+11	6,382E+11	4,227E+11	2,701E+11	1,772E+11	1,095E+11	6,622E+10	4,515E+10
R (kV)	4,905E+10	4,490E+10	2,659E+10	2,002E+10	1,210E+10	7,260E+09	4,710E+09	2,700E+09
Me (kV)	7,321E+11	6,547E+11	4,288E+11	2,787E+11	1,783E+11	1,122E+11	6,981E+10	4,525E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	7,259E+11	6,421E+11	4,257E+11	2,743E+11	1,779E+11	1,119E+11	6,677E+10	4,520E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	7,593E+11	6,652E+11	4,484E+11	2,844E+11	1,791E+11	1,164E+11	6,996E+10	4,719E+10
μ (kV)	7,416E+11	6,567E+11	4,350E+11	2,795E+11	1,804E+11	1,134E+11	6,874E+10	4,613E+10
σ (kV)	1,938E+10	1,630E+10	1,149E+10	7,114E+09	4,512E+09	2,802E+09	1,879E+09	1,156E+09
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	3,754E+20	2,657E+20	1,320E+20	5,061E+19	2,036E+19	7,851E+18	3,532E+18	1,336E+18
v (%)	2,613	2,482	2,641	2,545	2,502	2,472	2,734	2,506



Tab. 31 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,3 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	7,294E+11	6,494E+11	4,127E+11	2,478E+11	1,763E+11	9,764E+10	6,795E+10	4,653E+10
2. hodnota	7,016E+11	6,083E+11	4,389E+11	2,509E+11	1,676E+11	9,561E+10	6,972E+10	4,239E+10
3. hodnota	7,562E+11	6,174E+11	4,386E+11	2,663E+11	1,733E+11	9,895E+10	6,536E+10	4,556E+10
4. hodnota	7,355E+11	6,590E+11	4,233E+11	2,605E+11	1,735E+11	9,908E+10	6,449E+10	4,476E+10
5. hodnota	6,987E+11	6,427E+11	4,124E+11	2,483E+11	1,616E+11	9,187E+10	6,854E+10	4,481E+10
Max (kV)	7,562E+11	6,590E+11	4,389E+11	2,663E+11	1,763E+11	9,908E+10	6,972E+10	4,653E+10
Min (kV)	6,987E+11	6,083E+11	4,124E+11	2,478E+11	1,616E+11	9,187E+10	6,449E+10	4,239E+10
R (kV)	5,745E+10	5,063E+10	2,645E+10	1,853E+10	1,465E+10	7,210E+09	5,230E+09	4,140E+09
Me (kV)	7,294E+11	6,427E+11	4,233E+11	2,509E+11	1,733E+11	9,764E+10	6,795E+10	4,481E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	7,016E+11	6,174E+11	4,127E+11	2,483E+11	1,676E+11	9,561E+10	6,536E+10	4,476E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	7,355E+11	6,494E+11	4,386E+11	2,605E+11	1,735E+11	9,895E+10	6,854E+10	4,556E+10
μ (kV)	7,243E+11	6,354E+11	4,252E+11	2,547E+11	1,705E+11	9,663E+10	6,721E+10	4,481E+10
σ (kV)	2,161E+10	1,928E+10	1,175E+10	7,383E+09	5,231E+09	2,687E+09	1,972E+09	1,370E+09
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	4,670E+20	3,718E+20	1,380E+20	5,451E+19	2,736E+19	7,221E+18	3,887E+18	1,876E+18
v (%)	2,984	3,035	2,763	2,898	3,069	2,781	2,934	3,057

Tab. 32 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,4 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	6,209E+11	5,773E+11	3,743E+11	2,416E+11	1,476E+11	8,962E+10	6,708E+10	4,185E+10
2. hodnota	6,226E+11	5,603E+11	3,635E+11	2,393E+11	1,398E+11	8,919E+10	6,287E+10	3,989E+10
3. hodnota	6,653E+11	5,994E+11	3,916E+11	2,258E+11	1,412E+11	8,959E+10	6,803E+10	4,006E+10
4. hodnota	6,304E+11	5,694E+11	3,939E+11	2,228E+11	1,495E+11	8,434E+10	6,682E+10	4,295E+10
5. hodnota	6,613E+11	6,064E+11	3,779E+11	2,302E+11	1,503E+11	8,403E+10	6,351E+10	4,245E+10
Max (kV)	6,653E+11	6,064E+11	3,939E+11	2,416E+11	1,503E+11	8,962E+10	6,803E+10	4,295E+10
Min (kV)	6,209E+11	5,603E+11	3,635E+11	2,228E+11	1,398E+11	8,403E+10	6,287E+10	3,989E+10
R (kV)	4,442E+10	4,607E+10	3,033E+10	1,879E+10	1,042E+10	5,590E+09	5,160E+09	3,060E+09
Me (kV)	6,304E+11	5,773E+11	3,779E+11	2,302E+11	1,476E+11	8,919E+10	6,682E+10	4,185E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	6,226E+11	5,694E+11	3,743E+11	2,258E+11	1,412E+11	8,434E+10	6,351E+10	4,006E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	6,613E+11	5,994E+11	3,916E+11	2,393E+11	1,495E+11	8,959E+10	6,708E+10	4,245E+10
μ (kV)	6,401E+11	5,825E+11	3,802E+11	2,319E+11	1,457E+11	8,735E+10	6,566E+10	4,144E+10
σ (kV)	1,927E+10	1,759E+10	1,126E+10	7,366E+09	4,318E+09	2,594E+09	2,068E+09	1,247E+09
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	3,714E+20	3,095E+20	1,268E+20	5,425E+19	1,864E+19	6,728E+18	4,277E+18	1,555E+18
v (%)	3,011	3,020	2,962	3,176	2,964	2,969	3,150	3,009

Tab. 33 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,5 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	5,504E+11	5,157E+11	3,483E+11	1,806E+11	1,084E+11	6,708E+10	5,135E+10	3,384E+10
2. hodnota	5,467E+11	5,140E+11	3,421E+11	1,804E+11	1,182E+11	6,702E+10	5,336E+10	3,316E+10
3. hodnota	5,803E+11	4,935E+11	3,594E+11	1,724E+11	1,169E+11	7,058E+10	5,105E+10	3,176E+10
4. hodnota	5,434E+11	4,726E+11	3,519E+11	1,853E+11	1,167E+11	7,235E+10	5,425E+10	3,209E+10
5. hodnota	5,847E+11	4,973E+11	3,256E+11	1,713E+11	1,129E+11	6,814E+10	5,559E+10	3,108E+10
Max (kV)	5,847E+11	5,157E+11	3,594E+11	1,853E+11	1,182E+11	7,235E+10	5,559E+10	3,384E+10
Min (kV)	5,434E+11	4,726E+11	3,256E+11	1,713E+11	1,084E+11	6,702E+10	5,105E+10	3,108E+10
R (kV)	4,131E+10	4,309E+10	3,383E+10	1,409E+10	9,800E+09	5,330E+09	4,540E+09	2,760E+09
Me (kV)	5,504E+11	4,973E+11	3,483E+11	1,804E+11	1,167E+11	6,814E+10	5,336E+10	3,209E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	5,467E+11	4,935E+11	3,421E+11	1,724E+11	1,129E+11	6,708E+10	5,135E+10	3,176E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	5,803E+11	5,140E+11	3,519E+11	1,806E+11	1,169E+11	7,058E+10	5,425E+10	3,316E+10
μ (kV)	5,611E+11	4,986E+11	3,455E+11	1,780E+11	1,146E+11	6,903E+10	5,312E+10	3,239E+10
σ (kV)	1,768E+10	1,570E+10	1,141E+10	5,361E+09	3,577E+09	2,100E+09	1,724E+09	9,898E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	3,127E+20	2,464E+20	1,302E+20	2,874E+19	1,280E+19	4,412E+18	2,971E+18	9,797E+17
v (%)	3,152	3,148	3,303	3,012	3,121	3,043	3,245	3,056

Tab. 34 Základní statistické veličiny rezistivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 1 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,514E+11	2,951E+11	1,527E+11	9,698E+10	5,453E+10	3,706E+10	2,114E+10	1,022E+10
2. hodnota	3,945E+11	3,221E+11	1,704E+11	1,050E+11	4,966E+10	3,322E+10	2,294E+10	1,083E+10
3. hodnota	3,896E+11	3,339E+11	1,592E+11	9,508E+10	5,387E+10	3,501E+10	2,268E+10	9,975E+09
4. hodnota	3,606E+11	3,000E+11	1,744E+11	1,060E+11	4,806E+10	3,308E+10	2,043E+10	1,137E+10
5. hodnota	3,557E+11	3,000E+11	1,641E+11	9,603E+10	5,258E+10	3,667E+10	2,089E+10	1,029E+10
Max (kV)	3,945E+11	3,339E+11	1,744E+11	1,060E+11	5,453E+10	3,706E+10	2,294E+10	1,137E+10
Min (kV)	3,514E+11	2,951E+11	1,527E+11	9,508E+10	4,806E+10	3,308E+10	2,043E+10	9,975E+09
R (kV)	4,315E+10	3,879E+10	2,165E+10	1,096E+10	6,470E+09	3,980E+09	2,510E+09	1,395E+09
Me (kV)	3,606E+11	3,000E+11	1,641E+11	9,698E+10	5,258E+10	3,501E+10	2,114E+10	1,029E+10
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,557E+11	3,000E+11	1,592E+11	9,603E+10	4,966E+10	3,322E+10	2,089E+10	1,022E+10
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,896E+11	3,221E+11	1,704E+11	1,050E+11	5,387E+10	3,667E+10	2,268E+10	1,083E+10
μ (kV)	3,703E+11	3,102E+11	1,641E+11	9,982E+10	5,174E+10	3,501E+10	2,162E+10	1,054E+10
σ (kV)	1,802E+10	1,508E+10	7,717E+09	4,695E+09	2,486E+09	1,667E+09	1,005E+09	5,014E+08
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	3,246E+20	2,275E+20	5,955E+19	2,204E+19	6,179E+18	2,777E+18	1,009E+18	2,514E+17
v (%)	4,865	4,861	4,701	4,703	4,804	4,761	4,647	4,759

Tab. 35 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému s obsahem nanopřísad 0 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,053	2,853	2,981	2,972	2,801	2,732	2,826	2,749
2. hodnota	2,888	2,921	2,805	2,806	2,755	2,847	2,701	2,655
3. hodnota	2,874	2,856	2,944	2,877	2,719	2,735	2,826	2,708
4. hodnota	2,923	3,026	2,961	2,894	2,912	2,891	2,674	2,818
5. hodnota	3,036	3,054	2,831	2,761	2,921	2,708	2,702	2,614
Max (kV)	3,053	3,054	2,981	2,972	2,921	2,891	2,826	2,818
Min (kV)	2,874	2,853	2,805	2,761	2,719	2,708	2,674	2,614
R (kV)	0,179	0,201	0,176	0,211	0,202	0,183	0,152	0,204
Me (kV)	2,923	2,921	2,944	2,877	2,801	2,735	2,702	2,708
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,888	2,856	2,831	2,806	2,755	2,732	2,701	2,655
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,036	3,026	2,961	2,894	2,912	2,847	2,826	2,749
μ (kV)	2,955	2,942	2,904	2,862	2,822	2,783	2,746	2,709
σ (kV)	0,075	0,084	0,072	0,073	0,082	0,073	0,066	0,071
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,007	0,005	0,005	0,007	0,005	0,004	0,005
v (%)	2,543	2,858	2,478	2,553	2,898	2,606	2,413	2,632

Tab. 36 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,01 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,046	2,892	3,002	2,945	2,742	2,702	2,662	2,635
2. hodnota	3,021	3,068	2,845	2,804	2,944	2,874	2,845	2,796
3. hodnota	2,895	3,021	2,861	2,921	2,818	2,714	2,712	2,671
4. hodnota	2,859	2,873	3,021	2,776	2,911	2,863	2,721	2,803
5. hodnota	3,021	2,945	2,848	2,929	2,765	2,826	2,836	2,672
Max (kV)	3,046	3,068	3,021	2,945	2,944	2,874	2,845	2,803
Min (kV)	2,859	2,873	2,845	2,776	2,742	2,702	2,662	2,635
R (kV)	0,187	0,195	0,176	0,169	0,202	0,172	0,183	0,168
Me (kV)	3,021	2,945	2,861	2,921	2,818	2,826	2,721	2,672
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,895	2,892	2,848	2,804	2,765	2,714	2,712	2,671
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,021	3,021	3,002	2,929	2,911	2,863	2,836	2,796
μ (kV)	2,968	2,960	2,915	2,875	2,836	2,796	2,755	2,715
σ (kV)	0,076	0,075	0,079	0,070	0,079	0,074	0,073	0,070
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005
v (%)	2,562	2,519	2,706	2,448	2,798	2,630	2,633	2,577

Tab. 37 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,02 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	2,865	3,081	3,019	2,784	2,805	2,882	2,879	2,585
2. hodnota	3,082	2,992	2,792	3,008	2,819	2,807	2,703	2,712
3. hodnota	2,972	2,865	2,915	2,872	2,815	2,861	2,681	2,768
4. hodnota	3,025	2,929	2,955	2,928	2,792	2,698	2,793	2,694
5. hodnota	2,932	2,953	2,918	2,798	2,995	2,776	2,761	2,815
Max (kV)	3,082	3,081	3,019	3,008	2,995	2,882	2,879	2,815
Min (kV)	2,865	2,865	2,792	2,784	2,792	2,698	2,681	2,585
R (kV)	0,217	0,216	0,227	0,224	0,203	0,184	0,198	0,230
Me (kV)	2,972	2,953	2,918	2,872	2,815	2,807	2,761	2,712
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,932	2,929	2,915	2,798	2,805	2,776	2,703	2,694
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,025	2,992	2,955	2,928	2,819	2,861	2,793	2,768
μ (kV)	2,975	2,964	2,920	2,878	2,845	2,805	2,763	2,715
σ (kV)	0,075	0,072	0,074	0,083	0,075	0,065	0,070	0,078
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,005	0,005	0,007	0,006	0,004	0,005	0,006
v (%)	2,511	2,415	2,537	2,893	2,653	2,330	2,543	2,861

Tab. 38 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,03 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,084	2,973	2,809	2,775	2,772	2,874	2,840	2,761
2. hodnota	2,955	2,889	2,967	2,954	2,757	2,908	2,735	2,806
3. hodnota	2,871	3,082	3,016	2,977	2,873	2,700	2,694	2,624
4. hodnota	3,036	3,036	2,991	2,876	2,931	2,767	2,709	2,667
5. hodnota	2,982	2,879	2,854	2,842	2,924	2,803	2,862	2,765
Max (kV)	3,084	3,082	3,016	2,977	2,931	2,908	2,862	2,806
Min (kV)	2,871	2,879	2,809	2,775	2,757	2,700	2,694	2,624
R (kV)	0,213	0,203	0,207	0,202	0,174	0,208	0,168	0,182
Me (kV)	2,982	2,973	2,967	2,876	2,873	2,803	2,735	2,761
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,955	2,889	2,854	2,842	2,772	2,767	2,709	2,667
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,036	3,036	2,991	2,954	2,924	2,874	2,840	2,765
μ (kV)	2,986	2,972	2,927	2,885	2,851	2,810	2,768	2,725
σ (kV)	0,073	0,080	0,081	0,074	0,074	0,074	0,069	0,068
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,005	0,006	0,007	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005
v (%)	2,429	2,681	2,770	2,559	2,591	2,648	2,506	2,490

Tab. 39 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,04 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,098	2,928	2,919	2,910	2,954	2,765	2,859	2,708
2. hodnota	3,077	3,093	2,859	2,847	2,909	2,719	2,683	2,829
3. hodnota	2,985	3,077	3,002	2,981	2,767	2,906	2,848	2,698
4. hodnota	2,884	2,881	3,062	2,801	2,891	2,908	2,681	2,798
5. hodnota	2,961	2,959	2,894	2,984	2,787	2,807	2,788	2,646
Max (kV)	3,098	3,093	3,062	2,984	2,954	2,908	2,859	2,829
Min (kV)	2,884	2,881	2,859	2,801	2,767	2,719	2,681	2,646
R (kV)	0,214	0,212	0,203	0,183	0,187	0,189	0,178	0,183
Me (kV)	2,985	2,959	2,919	2,910	2,891	2,807	2,788	2,708
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,961	2,928	2,894	2,847	2,787	2,765	2,683	2,698
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,077	3,077	3,002	2,981	2,909	2,906	2,848	2,798
μ (kV)	3,001	2,988	2,947	2,905	2,862	2,821	2,772	2,736
σ (kV)	0,078	0,083	0,074	0,072	0,072	0,076	0,077	0,068
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,007	0,006	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005
v (%)	2,612	2,794	2,520	2,493	2,528	2,678	2,785	2,469

Tab. 40 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,05 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,113	3,011	2,998	2,995	2,906	2,754	2,779	2,643
2. hodnota	3,118	2,902	2,924	2,863	2,791	2,749	2,856	2,808
3. hodnota	2,948	3,079	2,892	2,924	2,779	2,922	2,884	2,814
4. hodnota	2,937	3,118	3,099	2,999	2,995	2,821	2,721	2,767
5. hodnota	3,002	2,934	2,906	2,821	2,909	2,902	2,696	2,691
Max (kV)	3,118	3,118	3,099	2,999	2,995	2,922	2,884	2,814
Min (kV)	2,937	2,902	2,892	2,821	2,779	2,749	2,696	2,643
R (kV)	0,181	0,216	0,207	0,178	0,216	0,173	0,188	0,171
Me (kV)	3,002	3,011	2,924	2,924	2,906	2,821	2,779	2,767
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,948	2,934	2,906	2,863	2,791	2,754	2,721	2,691
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,113	3,079	2,998	2,995	2,909	2,902	2,856	2,808
μ (kV)	3,024	3,009	2,964	2,920	2,876	2,830	2,787	2,745
σ (kV)	0,078	0,082	0,077	0,071	0,081	0,072	0,073	0,067
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,007	0,006	0,005	0,007	0,005	0,005	0,005
v (%)	2,587	2,735	2,593	2,418	2,816	2,552	2,630	2,446

Tab. 41 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,06 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,123	3,034	2,897	2,931	2,796	2,942	2,712	2,856
2. hodnota	3,131	3,115	2,888	2,853	2,891	2,925	2,747	2,765
3. hodnota	3,066	2,952	3,041	2,859	2,815	2,859	2,874	2,828
4. hodnota	2,959	3,111	3,097	3,025	2,974	2,755	2,805	2,678
5. hodnota	2,945	2,924	2,969	3,002	2,985	2,781	2,902	2,696
Max (kV)	3,131	3,115	3,097	3,025	2,985	2,942	2,902	2,856
Min (kV)	2,945	2,924	2,888	2,853	2,796	2,755	2,712	2,678
R (kV)	0,186	0,191	0,209	0,172	0,189	0,187	0,190	0,178
Me (kV)	3,066	3,034	2,969	2,931	2,891	2,859	2,805	2,765
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,959	2,952	2,897	2,859	2,815	2,781	2,747	2,696
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,123	3,111	3,041	3,002	2,974	2,925	2,874	2,828
μ (kV)	3,045	3,027	2,978	2,934	2,892	2,852	2,808	2,765
σ (kV)	0,079	0,079	0,081	0,071	0,078	0,075	0,072	0,070
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,006	0,007	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005
v (%)	2,599	2,605	2,722	2,415	2,701	2,620	2,575	2,536

Tab. 42 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,07 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	2,972	2,975	2,997	2,849	2,985	2,952	2,911	2,706
2. hodnota	3,166	3,042	2,865	2,897	3,005	2,791	2,855	2,788
3. hodnota	3,149	2,952	2,968	3,002	2,811	2,952	2,706	2,698
4. hodnota	3,053	3,129	3,073	3,054	2,825	2,781	2,841	2,854
5. hodnota	2,987	3,141	3,071	2,956	2,901	2,863	2,783	2,879
Max (kV)	3,166	3,141	3,073	3,054	3,005	2,952	2,911	2,879
Min (kV)	2,972	2,952	2,865	2,849	2,811	2,781	2,706	2,698
R (kV)	0,194	0,189	0,208	0,205	0,194	0,171	0,205	0,181
Me (kV)	3,053	3,042	2,997	2,956	2,901	2,863	2,841	2,788
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,987	2,975	2,968	2,897	2,825	2,791	2,783	2,706
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,149	3,129	3,071	3,002	2,985	2,952	2,855	2,854
μ (kV)	3,065	3,048	2,995	2,952	2,905	2,868	2,819	2,785
σ (kV)	0,080	0,077	0,077	0,073	0,080	0,074	0,070	0,074
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005
v (%)	2,615	2,533	2,565	2,469	2,738	2,592	2,473	2,659



Tab. 43 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,08 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,167	2,966	3,018	2,854	2,842	2,792	2,722	2,696
2. hodnota	3,185	2,981	3,071	3,073	2,985	2,794	2,846	2,784
3. hodnota	3,073	3,129	2,904	2,897	2,835	2,989	2,792	2,735
4. hodnota	2,999	3,158	3,116	2,969	2,958	2,935	2,901	2,897
5. hodnota	2,985	3,082	2,955	3,024	3,005	2,873	2,918	2,841
Max (kV)	3,185	3,158	3,116	3,073	3,005	2,989	2,918	2,897
Min (kV)	2,985	2,966	2,904	2,854	2,835	2,792	2,722	2,696
R (kV)	0,200	0,192	0,212	0,219	0,170	0,197	0,196	0,201
Me (kV)	3,073	3,082	3,018	2,969	2,958	2,873	2,846	2,784
X <sub>0,25</sub> (kV)	2,999	2,981	2,955	2,897	2,842	2,794	2,792	2,735
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,167	3,129	3,071	3,024	2,985	2,935	2,901	2,841
μ (kV)	3,082	3,063	3,013	2,963	2,925	2,877	2,836	2,791
σ (kV)	0,083	0,077	0,076	0,080	0,072	0,078	0,072	0,072
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005	0,005
v (%)	2,684	2,523	2,538	2,704	2,469	2,694	2,542	2,581

Tab. 44 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanoprísad 0,09 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,181	3,079	3,098	2,898	2,825	2,892	2,852	2,727
2. hodnota	2,995	3,195	3,124	2,975	2,876	2,819	2,762	2,703
3. hodnota	3,194	3,123	3,028	2,882	2,938	2,793	2,761	2,834
4. hodnota	3,021	2,985	2,922	3,071	3,019	2,987	2,908	2,877
5. hodnota	3,089	2,992	2,966	3,054	2,999	2,952	2,945	2,855
Max (kV)	3,194	3,195	3,124	3,071	3,019	2,987	2,945	2,877
Min (kV)	2,995	2,985	2,922	2,882	2,825	2,793	2,761	2,703
R (kV)	0,199	0,210	0,202	0,189	0,194	0,194	0,184	0,174
Me (kV)	3,089	3,079	3,028	2,975	2,938	2,892	2,852	2,834
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,021	2,992	2,966	2,898	2,876	2,819	2,762	2,727
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,181	3,123	3,098	3,054	2,999	2,952	2,908	2,855
μ (kV)	3,096	3,075	3,028	2,976	2,931	2,889	2,846	2,799
σ (kV)	0,081	0,080	0,076	0,077	0,073	0,074	0,075	0,070
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005
v (%)	2,612	2,590	2,524	2,604	2,492	2,577	2,628	2,518

Tab. 45 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,1 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,055	3,193	2,943	3,001	2,952	2,836	2,943	2,724
2. hodnota	3,234	3,192	2,951	3,083	2,851	2,962	2,747	2,748
3. hodnota	3,005	3,084	3,028	2,866	2,876	2,989	2,779	2,912
4. hodnota	3,119	2,996	3,134	2,984	2,999	2,923	2,932	2,819
5. hodnota	3,162	3,011	3,121	3,042	3,054	2,801	2,856	2,879
Max (kV)	3,234	3,193	3,134	3,083	3,054	2,989	2,943	2,912
Min (kV)	3,005	2,996	2,943	2,866	2,851	2,801	2,747	2,724
R (kV)	0,229	0,197	0,191	0,217	0,203	0,188	0,196	0,188
Me (kV)	3,119	3,084	3,028	3,001	2,952	2,923	2,856	2,819
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,055	3,011	2,951	2,984	2,876	2,836	2,779	2,748
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,162	3,192	3,121	3,042	2,999	2,962	2,932	2,879
μ (kV)	3,115	3,095	3,035	2,995	2,946	2,902	2,851	2,816
σ (kV)	0,080	0,085	0,081	0,073	0,075	0,072	0,079	0,072
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,006	0,007	0,007	0,005	0,006	0,005	0,006	0,005
v (%)	2,572	2,741	2,667	2,442	2,559	2,493	2,764	2,574

Tab. 46 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,2 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,080	3,208	3,077	2,927	3,021	2,824	2,871	2,887
2. hodnota	3,021	3,109	3,137	3,099	3,056	2,855	2,947	2,829
3. hodnota	3,148	3,234	2,972	3,106	2,873	2,914	2,932	2,909
4. hodnota	3,216	3,030	3,135	3,001	2,949	3,007	2,790	2,768
5. hodnota	3,237	3,046	2,960	2,914	2,881	3,011	2,769	2,712
Max (kV)	3,237	3,234	3,137	3,106	3,056	3,011	2,947	2,909
Min (kV)	3,021	3,030	2,960	2,914	2,873	2,824	2,769	2,712
R (kV)	0,216	0,204	0,177	0,192	0,183	0,187	0,178	0,197
Me (kV)	3,148	3,109	3,077	3,001	2,949	2,914	2,871	2,829
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,080	3,046	2,972	2,927	2,881	2,855	2,790	2,768
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,216	3,208	3,135	3,099	3,021	3,007	2,932	2,887
μ (kV)	3,140	3,125	3,056	3,009	2,956	2,922	2,862	2,821
σ (kV)	0,081	0,083	0,077	0,082	0,073	0,077	0,072	0,073
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,007	0,007	0,006	0,007	0,005	0,006	0,005	0,005
v (%)	2,587	2,650	2,514	2,713	2,476	2,620	2,522	2,598

Tab. 47 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,25 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,232	3,039	3,174	3,108	2,978	2,882	2,864	2,905
2. hodnota	3,266	3,263	3,052	3,103	3,073	3,001	2,963	2,725
3. hodnota	3,097	3,076	3,138	3,027	2,884	2,922	2,957	2,917
4. hodnota	3,157	3,137	2,996	2,904	2,885	2,807	2,798	2,844
5. hodnota	3,047	3,208	2,983	2,935	3,036	3,016	2,793	2,782
Max (kV)	3,266	3,263	3,174	3,108	3,073	3,016	2,963	2,917
Min (kV)	3,047	3,039	2,983	2,904	2,884	2,807	2,793	2,725
R (kV)	0,219	0,224	0,191	0,204	0,189	0,209	0,170	0,192
Me (kV)	3,157	3,137	3,052	3,027	2,978	2,922	2,864	2,844
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,097	3,076	2,996	2,935	2,885	2,882	2,798	2,782
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,232	3,208	3,138	3,103	3,036	3,001	2,957	2,905
μ (kV)	3,160	3,145	3,069	3,015	2,971	2,926	2,875	2,835
σ (kV)	0,081	0,082	0,076	0,084	0,077	0,077	0,074	0,073
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,007	0,007	0,006	0,007	0,006	0,006	0,005	0,005
v (%)	2,578	2,621	2,473	2,785	2,591	2,640	2,567	2,574

Tab. 48 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,3 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,042	3,031	3,009	3,132	2,926	3,018	2,772	2,932
2. hodnota	3,306	3,058	3,002	2,916	3,089	3,036	2,975	2,765
3. hodnota	3,119	3,245	3,196	3,016	2,902	2,932	2,879	2,845
4. hodnota	3,179	3,209	3,014	3,096	2,885	2,855	2,984	2,925
5. hodnota	3,242	3,232	3,191	2,932	3,093	2,836	2,793	2,741
Max (kV)	3,306	3,245	3,196	3,132	3,093	3,036	2,984	2,932
Min (kV)	3,042	3,031	3,002	2,916	2,885	2,836	2,772	2,741
R (kV)	0,264	0,214	0,194	0,216	0,208	0,200	0,212	0,191
Me (kV)	3,179	3,209	3,014	3,016	2,926	2,932	2,879	2,845
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,119	3,058	3,009	2,932	2,902	2,855	2,793	2,765
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,242	3,232	3,191	3,096	3,089	3,018	2,975	2,925
μ (kV)	3,178	3,155	3,082	3,018	2,979	2,935	2,881	2,842
σ (kV)	0,092	0,091	0,091	0,086	0,092	0,082	0,088	0,079
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,008	0,008	0,008	0,007	0,009	0,007	0,008	0,006
v (%)	2,900	2,896	2,946	2,845	3,101	2,780	3,069	2,777

Tab. 49 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,4 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,043	3,291	3,002	3,042	2,894	2,833	2,908	2,767
2. hodnota	3,136	3,274	3,003	3,145	3,085	3,054	2,807	2,962
3. hodnota	3,299	3,092	3,101	3,158	2,869	2,876	3,005	2,876
4. hodnota	3,295	3,048	3,209	2,932	3,052	3,045	3,003	2,952
5. hodnota	3,187	3,174	3,208	2,946	3,059	2,967	2,802	2,766
Max (kV)	3,299	3,291	3,209	3,158	3,085	3,054	3,005	2,962
Min (kV)	3,043	3,048	3,002	2,932	2,869	2,833	2,802	2,766
R (kV)	0,256	0,243	0,207	0,226	0,216	0,221	0,203	0,196
Me (kV)	3,187	3,174	3,101	3,042	3,052	2,967	2,908	2,876
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,136	3,092	3,003	2,946	2,894	2,876	2,807	2,767
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,295	3,274	3,208	3,145	3,059	3,045	3,003	2,952
μ (kV)	3,192	3,176	3,105	3,045	2,992	2,955	2,905	2,865
σ (kV)	0,097	0,096	0,092	0,095	0,091	0,089	0,089	0,085
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,009	0,009	0,008	0,009	0,008	0,008	0,008	0,007
v (%)	3,051	3,029	2,968	3,128	3,044	2,995	3,072	2,983

Tab. 50 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,5 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,112	3,274	3,148	3,144	3,132	2,885	2,836	2,788
2. hodnota	3,103	3,205	3,031	3,199	2,901	2,841	2,817	2,997
3. hodnota	3,327	3,362	3,008	3,003	3,086	3,084	3,012	2,974
4. hodnota	3,204	3,077	3,209	2,923	2,908	2,985	3,045	2,791
5. hodnota	3,331	3,109	3,264	3,045	3,015	3,072	2,938	2,884
Max (kV)	3,331	3,362	3,264	3,199	3,132	3,084	3,045	2,997
Min (kV)	3,103	3,077	3,008	2,923	2,901	2,841	2,817	2,788
R (kV)	0,228	0,285	0,256	0,276	0,231	0,243	0,228	0,209
Me (kV)	3,204	3,205	3,148	3,045	3,015	2,985	2,938	2,884
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,112	3,109	3,031	3,003	2,908	2,885	2,836	2,791
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,327	3,274	3,209	3,144	3,086	3,072	3,012	2,974
μ (kV)	3,215	3,205	3,132	3,063	3,008	2,973	2,930	2,887
σ (kV)	0,099	0,105	0,099	0,099	0,093	0,097	0,091	0,088
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,010	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,008	0,008
v (%)	3,087	3,272	3,167	3,218	3,081	3,276	3,114	3,047

Tab. 51 Základní statistické veličiny reálné složky komplexní permitivity fluidního systému I s obsahem nanopřísad I (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	3,895	3,991	3,746	3,711	3,128	3,166	3,057	3,424
2. hodnota	3,544	3,702	3,595	3,788	3,385	3,382	3,284	3,196
3. hodnota	3,951	3,556	3,511	3,438	3,594	3,228	3,038	3,247
4. hodnota	3,524	3,775	3,417	3,534	3,382	3,605	3,355	3,078
5. hodnota	3,711	3,501	3,889	3,343	3,549	3,485	3,426	2,982
Max (kV)	3,951	3,991	3,889	3,788	3,594	3,605	3,426	3,424
Min (kV)	3,524	3,501	3,417	3,343	3,128	3,166	3,038	2,982
R (kV)	0,427	0,490	0,472	0,445	0,466	0,439	0,388	0,442
Me (kV)	3,711	3,702	3,595	3,534	3,385	3,382	3,284	3,196
X <sub>0,25</sub> (kV)	3,544	3,556	3,511	3,438	3,382	3,228	3,057	3,078
X <sub>0,75</sub> (kV)	3,895	3,775	3,746	3,711	3,549	3,485	3,355	3,247
μ (kV)	3,725	3,705	3,632	3,563	3,408	3,373	3,232	3,185
σ (kV)	0,175	0,174	0,168	0,166	0,164	0,161	0,157	0,151
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,031	0,030	0,028	0,027	0,027	0,026	0,025	0,023
v (%)	4,701	4,683	4,629	4,653	4,806	4,786	4,867	4,735

Tab. 52 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému s obsahem nanopřísad 0 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00152	0,00165	0,00248	0,00382	0,00639	0,00876	0,01278	0,01844
2. hodnota	0,00153	0,00156	0,00257	0,00397	0,00601	0,00941	0,01354	0,01812
3. hodnota	0,00148	0,00162	0,00247	0,00413	0,00589	0,00904	0,01264	0,01903
4. hodnota	0,00146	0,00155	0,00249	0,00392	0,00612	0,00884	0,01343	0,01895
5. hodnota	0,00143	0,00155	0,00238	0,00398	0,00605	0,00911	0,01311	0,01947
Max (kV)	0,00153	0,00165	0,00257	0,00413	0,00639	0,00941	0,01354	0,01947
Min (kV)	0,00143	0,00155	0,00238	0,00382	0,00589	0,00876	0,01264	0,01812
R (kV)	0,00010	0,00010	0,00019	0,00031	0,00050	0,00065	0,00090	0,00135
Me (kV)	0,00148	0,00156	0,00248	0,00397	0,00605	0,00904	0,01311	0,01895
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00146	0,00155	0,00247	0,00392	0,00601	0,00884	0,01278	0,01844
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00152	0,00162	0,00249	0,00398	0,00612	0,00911	0,01343	0,01903
μ (kV)	0,00148	0,00159	0,00248	0,00396	0,00609	0,00903	0,01310	0,01880
σ (kV)	0,00004	0,00004	0,00006	0,00010	0,00017	0,00023	0,00035	0,00047
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,507	2,603	2,440	2,536	2,736	2,524	2,681	2,513

Tab. 53 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,01 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00140	0,00154	0,00217	0,00369	0,00531	0,00803	0,01215	0,01602
2. hodnota	0,00131	0,00148	0,00235	0,00341	0,00553	0,00853	0,01202	0,01634
3. hodnota	0,00135	0,00151	0,00225	0,00354	0,00567	0,00814	0,01159	0,01702
4. hodnota	0,00139	0,00158	0,00228	0,00360	0,00562	0,00816	0,01195	0,01655
5. hodnota	0,00133	0,00148	0,00232	0,00353	0,00535	0,00790	0,01131	0,01709
Max (kV)	0,00140	0,00158	0,00235	0,00369	0,00567	0,00853	0,01215	0,01709
Min (kV)	0,00131	0,00148	0,00217	0,00341	0,00531	0,00790	0,01131	0,01602
R (kV)	0,00009	0,00010	0,00018	0,00028	0,00036	0,00063	0,00084	0,00107
Me (kV)	0,00135	0,00151	0,00228	0,00354	0,00553	0,00814	0,01195	0,01655
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00133	0,00148	0,00225	0,00353	0,00535	0,00803	0,01159	0,01634
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00139	0,00154	0,00232	0,00360	0,00562	0,00816	0,01202	0,01702
μ (kV)	0,00136	0,00152	0,00227	0,00355	0,00550	0,00815	0,01180	0,01660
σ (kV)	0,00003	0,00004	0,00006	0,00009	0,00014	0,00021	0,00031	0,00041
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,538	2,514	2,734	2,583	2,608	2,582	2,618	2,443

Tab. 54 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,02 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00137	0,00146	0,00210	0,00321	0,00478	0,00738	0,00982	0,01404
2. hodnota	0,00137	0,00142	0,00204	0,00305	0,00489	0,00710	0,01025	0,01401
3. hodnota	0,00129	0,00147	0,00211	0,00301	0,00481	0,00703	0,01012	0,01395
4. hodnota	0,00131	0,00139	0,00198	0,00299	0,00502	0,00685	0,00951	0,01341
5. hodnota	0,00133	0,00138	0,00200	0,00312	0,00466	0,00726	0,00979	0,01458
Max (kV)	0,00137	0,00147	0,00211	0,00321	0,00502	0,00738	0,01025	0,01458
Min (kV)	0,00129	0,00138	0,00198	0,00299	0,00466	0,00685	0,00951	0,01341
R (kV)	0,00008	0,00009	0,00013	0,00022	0,00036	0,00053	0,00074	0,00117
Me (kV)	0,00133	0,00142	0,00204	0,00305	0,00481	0,00710	0,00982	0,01401
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00131	0,00139	0,00200	0,00301	0,00478	0,00703	0,00979	0,01395
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00137	0,00146	0,00210	0,00312	0,00489	0,00726	0,01012	0,01404
μ (kV)	0,00133	0,00142	0,00205	0,00308	0,00483	0,00712	0,00990	0,01400
σ (kV)	0,00003	0,00004	0,00005	0,00008	0,00012	0,00018	0,00026	0,00037
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,399	2,536	2,542	2,614	2,474	2,577	2,640	2,651

Tab. 55 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,03 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00123	0,00132	0,00179	0,00272	0,00436	0,00578	0,00855	0,01110
2. hodnota	0,00118	0,00129	0,00188	0,00281	0,00424	0,00592	0,00804	0,01147
3. hodnota	0,00119	0,00139	0,00190	0,00287	0,00410	0,00586	0,00873	0,01179
4. hodnota	0,00117	0,00132	0,00191	0,00273	0,00418	0,00605	0,00842	0,01160
5. hodnota	0,00125	0,00136	0,00181	0,00289	0,00438	0,00622	0,00833	0,01102
Max (kV)	0,00125	0,00139	0,00191	0,00289	0,00438	0,00622	0,00873	0,01179
Min (kV)	0,00117	0,00129	0,00179	0,00272	0,00410	0,00578	0,00804	0,01102
R (kV)	0,00008	0,00010	0,00012	0,00017	0,00028	0,00044	0,00069	0,00077
Me (kV)	0,00119	0,00132	0,00188	0,00281	0,00424	0,00592	0,00842	0,01147
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00118	0,00132	0,00181	0,00273	0,00418	0,00586	0,00833	0,01110
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00123	0,00136	0,00190	0,00287	0,00436	0,00605	0,00855	0,01160
μ (kV)	0,00120	0,00134	0,00186	0,00280	0,00425	0,00597	0,00841	0,01140
σ (kV)	0,00003	0,00003	0,00005	0,00007	0,00011	0,00015	0,00023	0,00029
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,552	2,619	2,623	2,487	2,500	2,592	2,738	2,577

Tab. 56 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,04 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00094	0,00104	0,00144	0,00202	0,00332	0,00451	0,00668	0,00941
2. hodnota	0,00101	0,00105	0,00142	0,00214	0,00335	0,00461	0,00692	0,00978
3. hodnota	0,00096	0,00099	0,00146	0,00217	0,00317	0,00485	0,00695	0,00973
4. hodnota	0,00097	0,00098	0,00139	0,00214	0,00314	0,00483	0,00682	0,00914
5. hodnota	0,00095	0,00102	0,00136	0,00215	0,00329	0,00472	0,00646	0,00942
Max (kV)	0,00101	0,00105	0,00146	0,00217	0,00335	0,00485	0,00695	0,00978
Min (kV)	0,00094	0,00098	0,00136	0,00202	0,00314	0,00451	0,00646	0,00914
R (kV)	0,00007	0,00007	0,00010	0,00015	0,00021	0,00034	0,00049	0,00064
Me (kV)	0,00096	0,00102	0,00142	0,00214	0,00329	0,00472	0,00682	0,00942
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00095	0,00099	0,00139	0,00214	0,00317	0,00461	0,00668	0,00941
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00097	0,00104	0,00144	0,00215	0,00332	0,00483	0,00692	0,00973
μ (kV)	0,00097	0,00102	0,00141	0,00212	0,00325	0,00470	0,00677	0,00950
σ (kV)	0,00002	0,00003	0,00004	0,00005	0,00008	0,00013	0,00018	0,00023
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,502	2,685	2,514	2,502	2,568	2,754	2,656	2,471

Tab. 57 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,05 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00065	0,00079	0,00092	0,00148	0,00221	0,00353	0,00535	0,00741
2. hodnota	0,00068	0,00082	0,00097	0,00155	0,00235	0,00341	0,00502	0,00746
3. hodnota	0,00069	0,00083	0,00093	0,00146	0,00233	0,00335	0,00509	0,00792
4. hodnota	0,00065	0,00077	0,00093	0,00157	0,00225	0,00360	0,00537	0,00765
5. hodnota	0,00068	0,00080	0,00098	0,00153	0,00236	0,00346	0,00518	0,00778
Max (kV)	0,00069	0,00083	0,00098	0,00157	0,00236	0,00360	0,00537	0,00792
Min (kV)	0,00065	0,00077	0,00092	0,00146	0,00221	0,00335	0,00502	0,00741
R (kV)	0,00004	0,00006	0,00006	0,00011	0,00015	0,00025	0,00035	0,00051
Me (kV)	0,00068	0,00080	0,00093	0,00153	0,00233	0,00346	0,00518	0,00765
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00065	0,00079	0,00093	0,00148	0,00225	0,00341	0,00509	0,00746
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00068	0,00082	0,00097	0,00155	0,00235	0,00353	0,00535	0,00778
μ (kV)	0,00067	0,00080	0,00095	0,00152	0,00230	0,00347	0,00520	0,00764
σ (kV)	0,00002	0,00002	0,00002	0,00004	0,00006	0,00009	0,00014	0,00019
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,497	2,663	2,555	2,745	2,580	2,532	2,668	2,505

Tab. 58 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,06 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00062	0,00070	0,00082	0,00140	0,00197	0,00295	0,00448	0,00639
2. hodnota	0,00060	0,00068	0,00086	0,00142	0,00183	0,00301	0,00457	0,00665
3. hodnota	0,00058	0,00069	0,00087	0,00136	0,00187	0,00289	0,00439	0,00692
4. hodnota	0,00059	0,00073	0,00088	0,00146	0,00193	0,00309	0,00469	0,00658
5. hodnota	0,00062	0,00072	0,00084	0,00145	0,00191	0,00307	0,00435	0,00667
Max (kV)	0,00062	0,00073	0,00088	0,00146	0,00197	0,00309	0,00469	0,00692
Min (kV)	0,00058	0,00068	0,00082	0,00136	0,00183	0,00289	0,00435	0,00639
R (kV)	0,00004	0,00005	0,00006	0,00010	0,00014	0,00020	0,00034	0,00053
Me (kV)	0,00060	0,00070	0,00086	0,00142	0,00191	0,00301	0,00448	0,00665
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00059	0,00069	0,00084	0,00140	0,00187	0,00295	0,00439	0,00658
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00062	0,00072	0,00087	0,00145	0,00193	0,00307	0,00457	0,00667
μ (kV)	0,00060	0,00070	0,00085	0,00142	0,00190	0,00300	0,00450	0,00664
σ (kV)	0,00002	0,00002	0,00002	0,00004	0,00005	0,00007	0,00012	0,00017
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,658	2,635	2,522	2,539	2,541	2,478	2,741	2,568



Tab. 59 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,07 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00057	0,00066	0,00079	0,00134	0,00184	0,00284	0,00412	0,00612
2. hodnota	0,00058	0,00068	0,00084	0,00137	0,00188	0,00292	0,00432	0,00631
3. hodnota	0,00061	0,00067	0,00085	0,00138	0,00182	0,00285	0,00445	0,00643
4. hodnota	0,00058	0,00071	0,00084	0,00144	0,00194	0,00301	0,00427	0,00627
5. hodnota	0,00060	0,00070	0,00083	0,00142	0,00180	0,00302	0,00420	0,00658
Max (kV)	0,00061	0,00071	0,00085	0,00144	0,00194	0,00302	0,00445	0,00658
Min (kV)	0,00057	0,00066	0,00079	0,00134	0,00180	0,00284	0,00412	0,00612
R (kV)	0,00004	0,00005	0,00006	0,00010	0,00014	0,00018	0,00033	0,00046
Me (kV)	0,00058	0,00068	0,00084	0,00138	0,00184	0,00292	0,00427	0,00631
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00058	0,00067	0,00083	0,00137	0,00182	0,00285	0,00420	0,00627
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00060	0,00070	0,00084	0,00142	0,00188	0,00301	0,00432	0,00643
μ (kV)	0,00059	0,00068	0,00083	0,00139	0,00186	0,00293	0,00427	0,00634
σ (kV)	0,00001	0,00002	0,00002	0,00004	0,00005	0,00008	0,00011	0,00015
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,499	2,712	2,527	2,574	2,674	2,605	2,613	2,442

Tab. 60 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,08 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00054	0,00067	0,00077	0,00131	0,00174	0,00279	0,00384	0,00615
2. hodnota	0,00057	0,00066	0,00082	0,00137	0,00182	0,00273	0,00397	0,00591
3. hodnota	0,00057	0,00067	0,00079	0,00138	0,00187	0,00281	0,00398	0,00605
4. hodnota	0,00058	0,00064	0,00083	0,00131	0,00179	0,00295	0,00405	0,00578
5. hodnota	0,00055	0,00063	0,00081	0,00139	0,00185	0,00285	0,00418	0,00618
Max (kV)	0,00058	0,00067	0,00083	0,00139	0,00187	0,00295	0,00418	0,00618
Min (kV)	0,00054	0,00063	0,00077	0,00131	0,00174	0,00273	0,00384	0,00578
R (kV)	0,00004	0,00004	0,00006	0,00008	0,00013	0,00022	0,00034	0,00040
Me (kV)	0,00057	0,00066	0,00081	0,00137	0,00182	0,00281	0,00398	0,00605
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00055	0,00064	0,00079	0,00131	0,00179	0,00279	0,00397	0,00591
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00057	0,00067	0,00082	0,00138	0,00185	0,00285	0,00405	0,00615
μ (kV)	0,00056	0,00065	0,00080	0,00135	0,00181	0,00283	0,00400	0,00601
σ (kV)	0,00001	0,00002	0,00002	0,00003	0,00005	0,00007	0,00011	0,00015
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,615	2,484	2,679	2,579	2,529	2,587	2,775	2,499

Tab. 61 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,09 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00050	0,00059	0,00071	0,00129	0,00181	0,00253	0,00362	0,00513
2. hodnota	0,00051	0,00061	0,00075	0,00128	0,00172	0,00258	0,00382	0,00535
3. hodnota	0,00054	0,00059	0,00074	0,00122	0,00171	0,00264	0,00376	0,00531
4. hodnota	0,00052	0,00058	0,00077	0,00125	0,00177	0,00271	0,00388	0,00537
5. hodnota	0,00053	0,00062	0,00073	0,00121	0,00169	0,00268	0,00389	0,00556
Max (kV)	0,00054	0,00062	0,00077	0,00129	0,00181	0,00271	0,00389	0,00556
Min (kV)	0,00050	0,00058	0,00071	0,00121	0,00169	0,00253	0,00362	0,00513
R (kV)	0,00004	0,00004	0,00006	0,00008	0,00012	0,00018	0,00027	0,00043
Me (kV)	0,00052	0,00059	0,00074	0,00125	0,00172	0,00264	0,00382	0,00535
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00051	0,00059	0,00073	0,00122	0,00171	0,00258	0,00376	0,00531
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00053	0,00061	0,00075	0,00128	0,00177	0,00268	0,00388	0,00537
μ (kV)	0,00052	0,00060	0,00074	0,00125	0,00174	0,00263	0,00379	0,00534
σ (kV)	0,00001	0,00001	0,00002	0,00003	0,00004	0,00007	0,00010	0,00014
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,720	2,458	2,703	2,530	2,518	2,494	2,602	2,570

Tab. 62 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,1 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00049	0,00058	0,00068	0,00118	0,00167	0,00243	0,00333	0,00462
2. hodnota	0,00049	0,00055	0,00072	0,00114	0,00164	0,00260	0,00339	0,00485
3. hodnota	0,00047	0,00056	0,00072	0,00119	0,00172	0,00258	0,00347	0,00469
4. hodnota	0,00046	0,00057	0,00068	0,00121	0,00175	0,00251	0,00359	0,00499
5. hodnota	0,00048	0,00054	0,00070	0,00113	0,00164	0,00259	0,00348	0,00486
Max (kV)	0,00049	0,00058	0,00072	0,00121	0,00175	0,00260	0,00359	0,00499
Min (kV)	0,00046	0,00054	0,00068	0,00113	0,00164	0,00243	0,00333	0,00462
R (kV)	0,00003	0,00004	0,00004	0,00008	0,00011	0,00017	0,00026	0,00037
Me (kV)	0,00048	0,00056	0,00070	0,00118	0,00167	0,00258	0,00347	0,00485
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00047	0,00055	0,00068	0,00114	0,00164	0,00251	0,00339	0,00469
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00049	0,00057	0,00072	0,00119	0,00172	0,00259	0,00348	0,00486
μ (kV)	0,00048	0,00056	0,00070	0,00117	0,00168	0,00254	0,00345	0,00480
σ (kV)	0,00001	0,00001	0,00002	0,00003	0,00004	0,00006	0,00009	0,00013
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,440	2,525	2,556	2,592	2,618	2,530	2,555	2,742

Tab. 63 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,2 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00047	0,00054	0,00067	0,00117	0,00164	0,00230	0,00311	0,00423
2. hodnota	0,00047	0,00051	0,00068	0,00114	0,00166	0,00240	0,00332	0,00444
3. hodnota	0,00045	0,00055	0,00070	0,00117	0,00163	0,00243	0,00323	0,00457
4. hodnota	0,00044	0,00053	0,00066	0,00112	0,00154	0,00239	0,00337	0,00436
5. hodnota	0,00046	0,00052	0,00065	0,00110	0,00165	0,00248	0,00326	0,00441
Max (kV)	0,00047	0,00055	0,00070	0,00117	0,00166	0,00248	0,00337	0,00457
Min (kV)	0,00044	0,00051	0,00065	0,00110	0,00154	0,00230	0,00311	0,00423
R (kV)	0,00003	0,00004	0,00005	0,00007	0,00012	0,00018	0,00026	0,00034
Me (kV)	0,00046	0,00053	0,00067	0,00114	0,00164	0,00240	0,00326	0,00441
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00045	0,00052	0,00066	0,00112	0,00163	0,00239	0,00323	0,00436
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00047	0,00054	0,00068	0,00117	0,00165	0,00243	0,00332	0,00444
μ (kV)	0,00046	0,00053	0,00067	0,00114	0,00162	0,00240	0,00326	0,00440
σ (kV)	0,00001	0,00001	0,00002	0,00003	0,00004	0,00006	0,00009	0,00011
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,546	2,668	2,560	2,418	2,659	2,458	2,714	2,511

Tab. 64 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,25 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00046	0,00050	0,00065	0,00108	0,00163	0,00231	0,00298	0,00389
2. hodnota	0,00045	0,00051	0,00066	0,00110	0,00158	0,00233	0,00316	0,00400
3. hodnota	0,00043	0,00050	0,00062	0,00112	0,00157	0,00238	0,00306	0,00412
4. hodnota	0,00046	0,00052	0,00065	0,00114	0,00166	0,00221	0,00311	0,00409
5. hodnota	0,00044	0,00048	0,00067	0,00106	0,00155	0,00227	0,00323	0,00419
Max (kV)	0,00046	0,00052	0,00067	0,00114	0,00166	0,00238	0,00323	0,00419
Min (kV)	0,00043	0,00048	0,00062	0,00106	0,00155	0,00221	0,00298	0,00389
R (kV)	0,00003	0,00004	0,00005	0,00008	0,00011	0,00017	0,00025	0,00030
Me (kV)	0,00045	0,00050	0,00065	0,00110	0,00158	0,00231	0,00311	0,00409
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00044	0,00050	0,00065	0,00108	0,00157	0,00227	0,00306	0,00400
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00046	0,00051	0,00066	0,00112	0,00163	0,00233	0,00316	0,00412
μ (kV)	0,00045	0,00050	0,00065	0,00110	0,00160	0,00230	0,00311	0,00406
σ (kV)	0,00001	0,00001	0,00002	0,00003	0,00004	0,00006	0,00009	0,00010
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,603	2,643	2,574	2,571	2,547	2,490	2,741	2,558

Tab. 65 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,3 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00059	0,00064	0,00077	0,00120	0,00194	0,00246	0,00389	0,00479
2. hodnota	0,00058	0,00066	0,00077	0,00130	0,00188	0,00260	0,00386	0,00484
3. hodnota	0,00054	0,00067	0,00081	0,00125	0,00178	0,00254	0,00376	0,00508
4. hodnota	0,00057	0,00065	0,00083	0,00123	0,00184	0,00257	0,00362	0,00489
5. hodnota	0,00056	0,00062	0,00078	0,00128	0,00186	0,00269	0,00368	0,00516
Max (kV)	0,00059	0,00067	0,00083	0,00130	0,00194	0,00269	0,00389	0,00516
Min (kV)	0,00054	0,00062	0,00077	0,00120	0,00178	0,00246	0,00362	0,00479
R (kV)	0,00005	0,00005	0,00006	0,00010	0,00016	0,00023	0,00027	0,00037
Me (kV)	0,00057	0,00065	0,00078	0,00125	0,00186	0,00257	0,00376	0,00489
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00056	0,00064	0,00077	0,00123	0,00184	0,00254	0,00368	0,00484
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00058	0,00066	0,00081	0,00128	0,00188	0,00260	0,00386	0,00508
μ (kV)	0,00057	0,00065	0,00079	0,00125	0,00186	0,00257	0,00376	0,00495
σ (kV)	0,00002	0,00002	0,00002	0,00004	0,00005	0,00008	0,00010	0,00014
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	3,029	2,655	3,030	2,831	2,804	2,924	2,734	2,888

Tab. 66 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,4 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00063	0,00076	0,00096	0,00156	0,00205	0,00277	0,00448	0,00592
2. hodnota	0,00066	0,00078	0,00092	0,00154	0,00202	0,00293	0,00453	0,00580
3. hodnota	0,00065	0,00080	0,00088	0,00149	0,00210	0,00301	0,00461	0,00621
4. hodnota	0,00063	0,00080	0,00094	0,00144	0,00221	0,00281	0,00424	0,00570
5. hodnota	0,00068	0,00074	0,00090	0,00146	0,00213	0,00288	0,00439	0,00579
Max (kV)	0,00068	0,00080	0,00096	0,00156	0,00221	0,00301	0,00461	0,00621
Min (kV)	0,00063	0,00074	0,00088	0,00144	0,00202	0,00277	0,00424	0,00570
R (kV)	0,00005	0,00006	0,00008	0,00012	0,00019	0,00024	0,00037	0,00051
Me (kV)	0,00065	0,00078	0,00092	0,00149	0,00210	0,00288	0,00448	0,00580
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00063	0,00076	0,00090	0,00146	0,00205	0,00281	0,00439	0,00579
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00066	0,00080	0,00094	0,00154	0,00213	0,00293	0,00453	0,00592
μ (kV)	0,00065	0,00078	0,00092	0,00150	0,00210	0,00288	0,00445	0,00588
σ (kV)	0,00002	0,00002	0,00003	0,00005	0,00007	0,00009	0,00013	0,00018
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	2,919	3,006	3,074	3,056	3,147	2,963	2,853	3,015

Tab. 67 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 0,5 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00074	0,00085	0,00118	0,00174	0,00253	0,00372	0,00517	0,00690
2. hodnota	0,00077	0,00086	0,00113	0,00185	0,00262	0,00352	0,00520	0,00726
3. hodnota	0,00080	0,00084	0,00121	0,00178	0,00250	0,00349	0,00495	0,00713
4. hodnota	0,00080	0,00081	0,00114	0,00188	0,00238	0,00340	0,00523	0,00714
5. hodnota	0,00075	0,00089	0,00111	0,00175	0,00247	0,00362	0,00545	0,00757
Max (kV)	0,00080	0,00089	0,00121	0,00188	0,00262	0,00372	0,00545	0,00757
Min (kV)	0,00074	0,00081	0,00111	0,00174	0,00238	0,00340	0,00495	0,00690
R (kV)	0,00006	0,00008	0,00010	0,00014	0,00024	0,00032	0,00050	0,00067
Me (kV)	0,00077	0,00085	0,00114	0,00178	0,00250	0,00352	0,00520	0,00714
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00075	0,00084	0,00113	0,00175	0,00247	0,00349	0,00517	0,00713
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00080	0,00086	0,00118	0,00185	0,00253	0,00362	0,00523	0,00726
μ (kV)	0,00077	0,00085	0,00115	0,00180	0,00250	0,00355	0,00520	0,00720
σ (kV)	0,00002	0,00003	0,00004	0,00006	0,00008	0,00011	0,00016	0,00022
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	3,215	3,068	3,129	3,083	3,129	3,106	3,062	3,037

Tab. 68 Základní statistické veličiny ztrátového činitele fluidního systému I s obsahem nanopřísad 1 (%)

	25 (°C)	30 (°C)	40 (°C)	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)	80 (°C)	90 (°C)
1. hodnota	0,00142	0,00162	0,00217	0,00365	0,00456	0,00606	0,00984	0,01428
2. hodnota	0,00147	0,00165	0,00227	0,00340	0,00442	0,00697	0,01029	0,01405
3. hodnota	0,00161	0,00174	0,00207	0,00347	0,00424	0,00642	0,01052	0,01261
4. hodnota	0,00158	0,00150	0,00198	0,00332	0,00448	0,00620	0,00943	0,01306
5. hodnota	0,00147	0,00158	0,00221	0,00315	0,00491	0,00654	0,00928	0,01303
Max (kV)	0,00161	0,00174	0,00227	0,00365	0,00491	0,00697	0,01052	0,01428
Min (kV)	0,00142	0,00150	0,00198	0,00315	0,00424	0,00606	0,00928	0,01261
R (kV)	0,00019	0,00024	0,00029	0,00050	0,00067	0,00091	0,00124	0,00167
Me (kV)	0,00147	0,00162	0,00217	0,00340	0,00448	0,00642	0,00984	0,01306
X <sub>0,25</sub> (kV)	0,00147	0,00158	0,00207	0,00332	0,00442	0,00620	0,00943	0,01303
X <sub>0,75</sub> (kV)	0,00158	0,00165	0,00221	0,00347	0,00456	0,00654	0,01029	0,01405
μ (kV)	0,00151	0,00162	0,00214	0,00340	0,00452	0,00644	0,00987	0,01341
σ (kV)	0,00007	0,00008	0,00010	0,00017	0,00022	0,00031	0,00048	0,00064
σ <sup>2</sup> (kV <sup>2</sup> )	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
v (%)	4,794	4,888	4,820	4,859	4,882	4,879	4,840	4,803