

Roman Cimbala, Lukáš Kruželák

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Napät'ová závislosť vybraných parametrov dielektrickej spektroskopie izolačnej kvapaliny

**Abstrakt.** Článok sa zaoberá výskumom a porovnaním napät'ovej závislosti kvapalného izolačného materiálu získaného technológiou gas-to-liquid. Bola skúmaná izolačná kvapalina, ktorá je používaná ako transformátorový olej pre svoje elektrické izolačné a chladiace vlastnosti. Boli získané napät'ové závislosti dielektrických parametrov kvapalného dielektrika metódou dielektrickej spektroskopie vo frekvenčnom rozsahu 0,1 mHz až 1 kHz.

**KLúčové slová:** transformátorový olej, gas-to-liquid, dielektrická spektroskopie, napät'ová závislosť.

**Abstract.** The article deals with research and comparison of voltage dependence of liquid insulation material obtained by gas-to-liquid technology. An insulating fluid that is used as a transformer oil for its electrical insulating and cooling properties has been investigated. The voltage dependences of the dielectric parameters of the liquid dielectric were obtained by the method of dielectric spectroscopy in the frequency range 0.1 mHz to 10 kHz.

**Keywords:** transformer oil, gas-to-liquid, dielectric spectroscopy, voltage dependences.

### Úvod

Súčasná globálna situácia v elektroenergetike je charakteristická rastúcim dopytom po spoľahlivej dodávke elektriny. Je to spôsobené zvyšujúcimi sa požiadavkami spoločností. To vedie k zvýšeniu požiadaviek na výrobu a distribúciu elektriny. V dôsledku starnutia výkonových transformátorov stojí priemysel pred náročnou výzvou eliminovať poruchy transformátorov, pretože ich opravy sú drahé. Transformátory patria medzi najdôležitejšie zariadenia v energetickom systéme, preto je potrebné venovať pozornosť monitorovaniu a diagnostike spoľahlivých metód, ktoré motivujú svetových lídrov k zlepšeniu spoľahlivosti a optimalizácii využitia všetkých komponentov systému. Ak by bolo možné pomocou príslušnej diagnostiky vopred zistiť zhoršenie kvality vinutia alebo izolácie v dôsledku nadprúdov alebo vlhkosti, je potrebné odoslať takýto transformátor na predbežnú podrobnú kontrolu skôr, ako dôjde k závažnej poruche [1]. Bežné diagnostické metódy zdôrazňujú zohľadnenie nevyhnutnosti krátkodobého odstavenia zariadenia, ako aj vykonanie minimálnych operácií potrebných na prípravu zariadenia na samotné meranie [2] [3].

Počas tohto experimentu sa pomocou dielektrickej spektroskopie merala napät'ová závislosť dielektrických parametrov elektrického izolačného oleja Shell DIALA S4 ZX-1.

Aplikácia Scheringové mostíka je jednou z najbežnejšie používaných metód na meranie kapacitného a disipačného faktora, ktorá v oblasti diagnostiky elektrických izolačných materiálov predstavuje preskúmanie materiálu a následnú analýzu dát za účelom získania informácií o stave a fyzikálno-chemických vlastnostiach izolácie systém [3] [5].

Pomocou dielektrickej spektroskopie sa získava informácia o distribúcii dielektrických parametrov vo frekvenčnej oblasti.

### Dielektrická spektroskopie

DS zahŕňa štúdium odozvy materiálu na elektrické pole, ktoré poskytuje štruktúrne informácie, t. j. molekulárnu štruktúru, fyzikálne usporiadanie a správanie molekúl v štruktúre. DS je osvedčená technika v oblasti fyziky, polymérov a koloidných materiálov a tiež vo farmácii. Používa sa na meranie dielektrických a elektrických vlastností média ako funkcie frekvencie [4]. Izolačné kvapaliny sú používané ako vynikajúce funkčné materiály pre dielektrické a elektrické izolačné aplikácie. DS bola overená ako užitočná technika na hodnotenie štruktúrnej

a molekulárnej dynamiky týchto materiálov. DS v izolačných materiálových systémoch sa špeciálne používa na skúmanie vzťahov medzi štruktúrami a vlastnosťami, čo pomáha optimalizovať podmienky zloženia a syntézy / spracovania, čo je užitočné pri navrhovaní nových funkčných materiálov s predpokladanými vlastnosťami [6].

Dielektrická spektroskopie meria dielektrickú permitivitu ako funkciu frekvencie a/aj ďalších parametrov, ako napr. teplota, napätie. Môže byť aplikovaná na všetky nevodivé materiály. Frekvenčný rozsah siaha okolo takmer 18 rádo: od  $\mu\text{Hz}$  do THz rozsahu blízko k infračervenej oblasti. Dielektrická spektroskopie je citlivá na dipolárne materiály, ako aj na lokalizované náboje v materiáli, určuje mini vyvolanú elektrickú silu, kinetiku a interakcie.

Dielektrická spektroskopie je teda vhodným nástrojom na vyhodnocovanie elektrickej charakterizácie nevodivých alebo polovodivých materiálov vo vzťahu k ich štruktúre a tiež elektronických alebo senzorových zariadení.

### Experiment

Cieľom experimentu bolo overiť napät'ovú závislosť vybraných dielektrických parametrov definovaných v ôsmych materiálových modeloch :

1. C, PF,  $\tan \delta$ 
  - a. C – kapacita
  - b. PF – power faktor
  - c.  $\tan \delta$  – činiteľ dielektrických strát
2. v komplexnej rovine
  - a.  $R_e$  – reálna zložka komplexnej impedancie
  - b.  $I_m(Z)$  – imaginárna zložka komplexnej impedancie
3. v polárnych súradniciach
  - a. Z – amplitúda komplexnej impedancie
  - b.  $\phi$  – uhol komplexnej impedancie
4. sériový RC model
  - a.  $C_s$  – kapacita sériového náhradného modelu
  - b.  $R_s$  – odpor sériového náhradného modelu
5. paralelný RC model
  - a.  $C_p$  – kapacita paralelného náhradného modelu

b.  $R_p$  – odpor paralelného náhradného modelu

6. odporový model

- a.  $\epsilon'$  – relatívna permitivita
- b.  $\sigma$  – merná vodivosť
- c.  $\rho$  – merný odpor
- d.  $\Delta \epsilon$  – diferenciacia permitivity

7. dielektrický model

- a.  $\epsilon'$  – reálna zložka permitivity
- b.  $\epsilon''$  – imaginárna zložka kapacity
- c.  $\tan \delta$  – činiteľ dielektrických strát

8. komplexná kapacita

- a.  $C'$  – reálna zložka kapacity
- b.  $C''$  – imaginárna zložka kapacity
- c.  $\Delta C$  – diferenciacia kapacity
- d.

Z teoretických fyzikálnych poznatkov vyplýva, že existujú skupiny vlastností, v ktorých parametre z jednotlivých modelov sú rovnaké:

1.  $\epsilon'$  – dielektrický a odporový model
2.  $\tan \delta$  – dielektrický a C,PF model
3.  $C_p$  – paralelný,  $C'$  – kapacitný komplexný a C – C, PF model
4.  $R_s$  – sériový RC model a  $R_e$  – komplexná rovina

Skúmaný kvapalný izolačný materiál transformátorový olej Shell DIALA S4 ZX-1 bol umiestnený v elektródovom systéme Keysight 16452A obr.1. Vzdialenosť elektród bola vymedzená medzikružím na hodnotu 0,1 mm. Objem aplikovanej kvapaliny bol 3 ml.



Obr. 1 Elektródový systém pre testovanie kvapalných izolačných materiálov Keysight 16452A



Obr. 2 Diagnostický analyzátor izolácie IDAX 300

Meranie dielektrických parametrov bolo vykonané pomocou prístroja IDAX 300 na obr. 2. Frekvenčný rozsah merania bol zvolený v intervale 0,1 mHz až 10 kHz pre testovacie napätia 1 V a 10 V. Pre testovacie napätie 100 V bolo možné uskutočniť meranie v rozsahu 0,1 mHz až 1 kHz.

Výsledky a diskusia.

V tabuľkách 1 až 4 sú uvedené výstupy dát z merania po odstránení duplicit pre napäťovú hladinu 1 V.

Obdobne boli získané údaje pre napäťové hladiny 10 V a 100 V. Aby bolo možné porovnať závislosti zvolených parametrov na napätí, boli vypočítané ich diferencie v percentách v závislosti na napätí. Zo záverečného hodnotenia boli eliminované také, ktoré vykazovali rovnaké tendencie.

Zo zobrazovaných priebehov je možné určiť, že hodnoty Power Factor a  $\tan \delta$  sa od frekvencie 47 mHz a vyššie zhodujú. Od frekvencie 220 mHz dochádza k zmene prírastku z kladného na záporný.

Od tejto frekvencie vyššie je nie je potvrdená napäťová závislosť parametrov  $C_s$ ,  $C_p$ ,  $\text{Arg}(Z)$ .

$\Delta \epsilon'$  vykazuje značné anomálie v užšom frekvenčnom rozsahu 10 Hz až 100 Hz.

Tab. 1

Frekvencia [Hz]	Cp [pF]	Rp [GΩ]	Cs [pF]	Rs [GΩ]
10000	66,985	0,028676	66,99	1,9685E-06
4700	66,898	0,16223	66,898	1,5794E-06
2200	66,852	0,78905	66,853	1,4841E-06
1000	66,859	5,1871	66,859	1,0924E-06
470	66,833	13,026	66,833	1,9709E-06
220	66,837	17,337	66,837	6,7575E-06
90	66,882	60,303	66,882	1,1593E-05
60	66,889	37,505	66,889	4,1932E-05
42	66,903	34,874	66,903	9,1992E-05
20	66,959	40,252	66,96	0,00035089
10	66,989	51,601	66,99	0,0010939
4,6	67,158	68,983	67,161	0,0038474
2,2	67,377	97,386	67,385	0,011837
1	67,629	135,24	67,65	0,040939
0,46	68,127	193,61	68,174	0,13313
0,22	68,653	260,14	68,766	0,42613
0,1	69,31	325,62	69,655	1,6113
0,046	70,041	367,7	71,305	6,5186
0,022	71,487	399,86	76,065	24,07
0,01	74,464	428,57	92,984	85,362
0,0046	80,137	458,31	151,25	215,49
0,0022	94,066	488,76	326,97	348,15
0,001	121,88	518,01	896,43	447,58
0,00046	170,13	565,45	2370,8	524,87
0,00022	257,55	613,86	5650,1	585,87
0,0001	419,81	694,25	12938	671,72

Tab. 2

Frekvencia [Hz]	Abs(Z) [×10 <sup>9</sup> ]	Arg(Z) [°]	σ [nS]	ρ [GΩ]
10000	0,00023759	-89,525	4,6094	0,21695
4700	0,00050618	-89,821	0,81479	1,2273
2200	0,0010821	-89,921	0,16752	5,9695
1000	0,0023805	-89,974	0,025482	39,243
470	0,0050668	-89,978	0,010148	98,545
220	0,010824	-89,964	0,0076242	131,16
90	0,02644	-89,975	0,002192	456,21
60	0,039657	-89,939	0,0035244	283,74
42	0,05664	-89,907	0,0037903	263,83
20	0,11884	-89,831	0,0032839	304,52
10	0,23758	-89,736	0,0025616	390,38
4,6	0,51518	-89,572	0,0019161	521,89

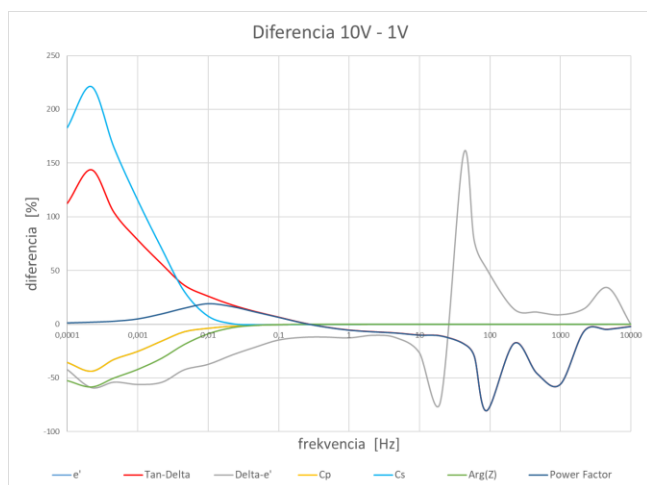
2,2	1,0736	-89,368	0,0013573	736,77
1	2,353	-89,003	0,0009774	1023,1
0,46	5,0769	-88,497	0,0006827	1464,7
0,22	10,529	-87,68	0,0005081	1968,1
0,1	22,906	-85,966	0,0004059	2463,4
0,046	48,958	-82,349	0,0003595	2781,8
0,022	98,105	-75,798	0,0003306	3025,1
0,01	191,27	-63,494	0,0003084	3242,3
0,0046	314,26	-46,709	0,0002884	3467,3
0,0022	412,5	-32,437	0,0002704	3697,6
0,001	481,51	-21,637	0,0002552	3918,9
0,00046	544,78	-15,538	0,0002338	4277,9
0,00022	599,7	-12,328	0,0002153	4644,1
0,0001	682,89	-10,377	0,0001904	5252,2

Tab. 3

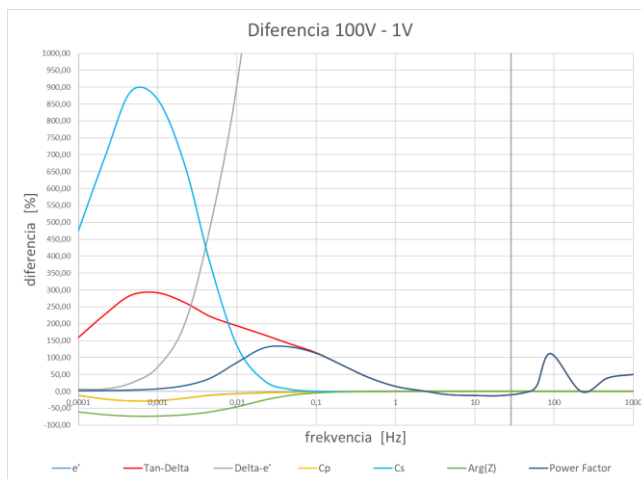
Frekvencia [Hz]	ε'	ε''	Δε'	tan δ
[Hz]	[-]	[-]	[-]	[-]
10000	1	0,0082854	0,001	0,008285
4700	0,99869	0,0031162	-0,0003095	0,00312
2200	0,99801	0,0013687	-0,0009857	0,001371
1000	0,99811	0,00045805	-0,0008851	0,000459
470	0,99773	0,00038809	-0,0012737	0,000389
220	0,99779	0,00062293	-0,0012147	0,000624
90	0,99846	0,00043778	-0,0005437	0,000438
60	0,99856	0,0010559	-0,0004439	0,001057
42	0,99877	0,0016222	-0,000227	0,001624
20	0,99961	0,0029514	0,00060553	0,002953
10	1,0001	0,0046045	0,0010517	0,004604
4,6	1,0026	0,0074875	0,0035699	0,007468
2,2	1,0058	0,01109	0,0068421	0,011025
1	1,0096	0,017569	0,010608	0,017401
0,46	1,017	0,026679	0,018037	0,026232
0,22	1,0249	0,041515	0,025899	0,040506
0,1	1,0347	0,072968	0,035709	0,07052
0,046	1,0456	0,14047	0,046612	0,13434
0,022	1,0672	0,27009	0,068195	0,25308
0,01	1,1116	0,5544	0,11264	0,49872
0,0046	1,1963	1,127	0,19734	0,94204
0,0022	1,4043	2,2097	0,40528	1,5735
0,001	1,8194	4,5867	0,82044	2,521
0,00046	2,5398	9,1346	1,5408	3,5966
0,00022	3,8449	17,593	2,8459	4,5758
0,0001	6,2672	34,224	5,2682	5,4607

Tab. 4

Frekvencia [Hz]	C'' [pF]	$\Delta C'$ [ $\times 10^{-12}$ ]	Im(Z) [ $\times 10^{-9}$ ]	Power Factor []
10000	0,555	6,0287E-11	-0,0002376	0,0082851
4700	0,20874	6,0199E-11	-0,0005062	0,0031202
2200	0,091684	6,0154E-11	-0,0010821	0,0013714
1000	0,030683	6,0161E-11	-0,0023805	0,00045891
470	0,025997	6,0135E-11	-0,0050668	0,00038898
220	0,041727	6,0139E-11	-0,010824	0,00062431
90	0,029325	6,0183E-11	-0,02644	0,00043846
60	0,070727	6,019E-11	-0,039657	0,0010574
42	0,10866	6,0205E-11	-0,05664	0,0016241
20	0,1977	6,026E-11	-0,11884	0,0029525
10	0,30843	6,029E-11	-0,23758	0,0046042
4,6	0,50155	6,0459E-11	-0,51516	0,0074681
2,2	0,74285	6,0678E-11	-1,0736	0,011025
1	1,1768	6,093E-11	-2,3526	0,017399
0,46	1,7871	6,1428E-11	-5,0751	0,026223
0,22	2,7809	6,1955E-11	-10,52	0,040473
0,1	4,8878	6,2612E-11	-22,849	0,070345
0,046	9,4095	6,3342E-11	-48,523	0,13315
0,022	18,092	6,4788E-11	-95,107	0,24535
0,01	37,137	6,7765E-11	-171,16	0,4463
0,0046	75,493	7,3439E-11	-228,75	0,6857
0,0022	148,01	8,7368E-11	-221,25	0,84398
0,001	307,25	1,1518E-10	-177,54	0,92954
0,00046	611,88	1,6343E-10	-145,94	0,96345
0,00022	1178,5	2,5085E-10	-128,04	0,97694
0,0001	2292,5	4,1311E-10	-123,01	0,98364



Obr.3 Frekvenčná závislosť diferencie 1 V – 10 V



Obr.4 Frekvenčná závislosť diferencie 100 V – 1 V

Zo zobrazovaných priebehov je možné určiť, že hodnoty Power Factor a  $\tan \delta$  sa od frekvencie 100 mHz a vyššie zhodujú. Od frekvencie 2,2 Hz dochádza k zmene prírastku z kladného na záporný. Uvedená frekvencia je 10-násobkom zistenej pri diferencii 10 V – 1 V. Ak v prípade diferencie 10 V – 1 V bol maximálny nárast  $\tan \delta$  1,5-násobný pri frekvencii 0,22 mHz, v prípade diferencie 100 V – 1 V to bol 3-násobný nárast pri frekvencii 0,46 mHz. Z toho vyplýva, že zvýšenie napätia o jednu dekadu má za následok 1-násobný maximálny nárast prírastku a aj jednonásobný nárast príslušnej frekvencie.

Diferenciu  $\Delta \epsilon'$  nebolo možné vyhodnotiť, nakoľko v rozsahu 10 mHz a vyššie boli rozdiely až 1000 násobné a za súčasného stavu nie je možné určiť fyzikálnu interpretáciu tohto javu.

#### Záver

Tento článok sa zaoberá meraním frekvenčnej závislosti dielektrických parametrov kvapalného izolačného materiálu pripraveného technológiou gas – to – liquid pri skúšobných napätiach 1, 10 a 100 V. Boli zistené napäťové diferencie skúmaných vlastností s cieľom potvrdiť alebo vyvrátiť napäťovú závislosť niektorých vybraných veličín charakterizujúcich materiálové vlastnosti oleja. Za najdôležitejšie zistenie je možné považovať dekadickú závislosť nárastu diferencie pre činiteľ dielektrických strát  $\tan \delta$  a úmerne zodpovedajúce zvýšenie frekvencie, pri ktorej bol tento jav zaznamenaný.

#### Literatúra

- [1] L. Kruželák : Analýza elektrofyzikálnych procesov vo vysokonapäťových izolačných materiáloch, dizertačná práca, Technická univerzita v Košiciach, 2020
- [2] V. Závistová. Magnetické častice a magnetické kvapaliny. Košice, 2011, s. 1-21.
- [3] A. M. Morega, M. Morega, L. Pâslaru-Dănescu, V. L. Stoica, F. Nouruş, F. D. Stoian: A Novel, Ferrofluid-Cooled Transformer. Electromagnetic Field and Heat Transfer by Numerical Simulation, OPTIM 2010, 12th Int. Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 22-24 May 2010, DOI 10.1109/OPTIM.2010.5510528, ISBN 978-1-4244-7019-8, pp. 401-406, Brasov, Romania.
- [4] D. Andelman. In: From Magnetic Solids and Fluids to Organic Films and Polymers. World Scientific, New Jersey, 2009, s. 1-56.
- [5] C. Tangthieng, B.A. Finlayson, J.S. Maulbetsch, T. Cader: Heat transfer enhancement in ferrofluids subjected to steady magnetic field. Timisoara, 8th International Conference on Magnetic Fluids (ICMF), Timisoara, Romania, June 29-July 3, 1998, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, pp 252-255, ISBN 0304-8853
- [6] KalimDeshmukh, SowmyaSankaran, BasheerAhamed, Kishor K.Sadasivuni, Khadheer S.K.Pasha, Deepalekshmi

Ponnamma, P.S.Rama Sreekanth, KuppannaChidambaram,  
Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization,  
Micro and Nano Technologies, 2017, Pages 237-299

**Pod'akovanie**

Práca bola podporená MŠVVaŠ v rámci projektu VEGA 1/0340/18, 2/0141/16 a 2/0011/20 a Slovenskou agentúrou pre výskum a vývoj na základe zmlúv č. APVV-18-0160 a APVV-15-0438.

**Autori:**

Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [roman.cimbala@tuke.sk](mailto:roman.cimbala@tuke.sk)  
Lukáš Kruželák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [lukas.kruzelak@tuke.sk](mailto:lukas.kruzelak@tuke.sk)