

## Meranie elektrických vlastností kremičitých minerálov

Karol Marton<sup>1</sup>, Araujo Jose<sup>2</sup> and Jaroslav Džmura<sup>1</sup>

### *The measurement of electric properties of silicate minerals*

*In the contribution a different approach to measurements concerning dielectric properties of powder materials and compact materials will be analysed. Measurements of relative permittivity at the frequency of 50 Hz will be performed and discussed provided that the powder is moistured at the beginning of the measurements. The conductivity measurements will be performed using the d.c. method. From the powder material separation point of view it is necessary to know its charging. At the end of the contribution, the new measure method related to the triboelectric charge determination will be introduced.*

**Key words:** relative permittivity, resistivity, silicates, capacity, resistance.

### Úvod

Elektrická separácia častíc makroskopickej veľkosti organického, resp. anorganického pôvodu zaujíma z hľadiska technologického ale aj ekologického jedno z popredných miest pri spracovaní a využití nerastných surovín. Efektívnosť separácie prirodzene závisí od elektrických vlastností práškov. Tieto majú poukázať na základné vstupné informácie potrebné pre návrh separátora.

Elektrické vlastnosti skúmaného média sú značne ovplyvnené niektorými ďalšími fyzikálnymi parametrami, ktoré vstupujú do interakcie s práškom: je to predovšetkým teplota prostredia, v ktorom sa prášok nachádza, vlhkosť okolia, merná hmotnosť častíc, ich veľkosť a v neposlednom rade aj chemické zloženie látok. Z toho dôvodu je potrebné vykonať základné dielektrické merania, ku ktorým patrí meranie relatívnej permitivity, merného elektrického odporu a nabíjateľnosti častíc makroskopickej veľkosti. V tomto prípade budeme vychádzať z triboefektu, resp. elektrokinetických javov vo vzťahu k vodivému materiálu PVC, kovu a gumy, pričom poukážeme na existenciu tzv. elektrizačného radu. Tento jav budeme sledovať nielen z hľadiska veľkosti náboja (kvantitatívne hľadisko), ale aj s ohľadom na polaritu náboja (kvalitatívne hľadisko).

Vďaka značným skúsenostiam pracoviska oddelení TVN na KEE v oblasti sledovania vlastností práškových častíc anorganického pôvodu, s vysokokvalitnými dielektrickými parametrami, poukážeme na možnosť aplikácie vyvinutých metód aj na látky kombinované, ktoré sú napr. prachové kremičitanové minerály s obsahom minerálnych zložiek definovaného zloženia.

### Meranie relatívnej permitivity práškov

V podstate ide o meranie heterogénneho systému, ktorý sa skladá minimálne z dvoch zložiek: z častíc tuhej fázy (prášku) a z plynu (vzduch). Plyn vyplňuje medzi priestory medzi časticami a zároveň je absorbovaný v tenkej vrstve na povrchu častice. Objemové a hmotnostne prevláda tuhá fáza nad plynnou. Charakter vrstvy a jej vlastnosti sú určené druhom a fyzikálnymi vlastnosťami prímiesi a plynu, granulometrickým a morfológickým zložením prímiesi a vonkajšími vplyvmi ukladania sa vrstvy a jej stavu. Zjednodušený model vrstiev prachových častíc je znázornený na obr. 1.

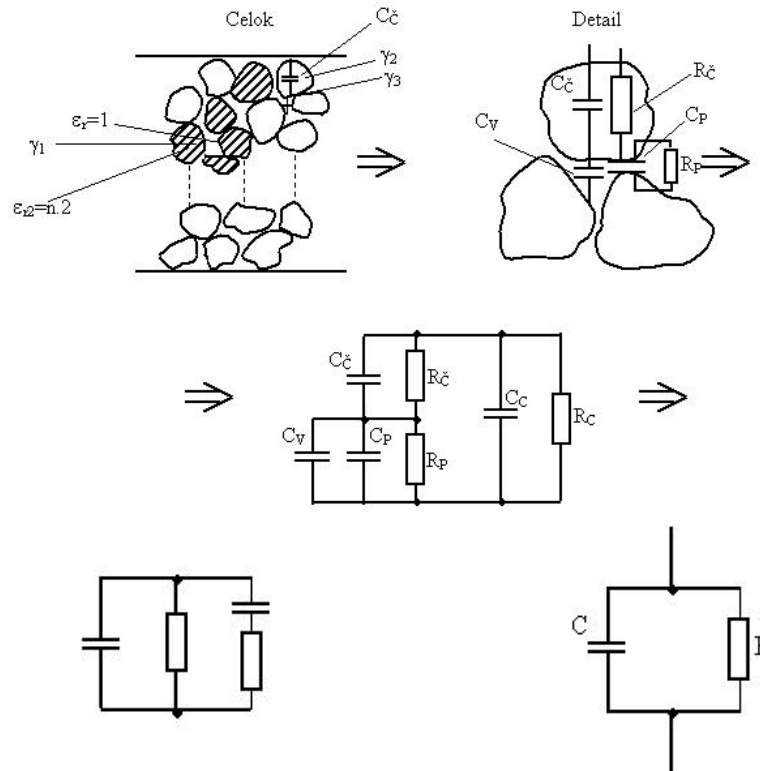
Relatívnu permitivitu zmesného dielektrika môžeme vypočítať na základe vzťahov, odvodených viacerými autormi, ktorí pri výpočte vychádzali zo zjednodušujúceho predpokladu, že sa jedná o guľovitý tvar častíc a ide o ideálne usporiadanie, prípadne uloženie čiastočiek. Z literatúry sú známe znižovacie pravidlá podľa Lorentz – Lorena, Wienera, Oehmeho a Lichteneckra.

Elektrický model prachových častíc je zobrazený na obrázku 1.

Na meranie permitivity prachových častíc s vysokou hodnotou merného odporu bol použitý presný vysokonapäťový Scheringov mostík firmy TETTEX na meranie kapacít a stratového činiteľa, ktorého frekvencia meracieho napätia je 50 Hz s regulovateľným napätím 0 – 2000 V. Pri meraní teplotnej závislosti bol použitý merný kondenzátor firmy TETTEX s vnútorným vyhrievaním meranej vzorky. Kontrolné merania boli zrealizované precíznym automatickým meračom kapacít TESLA, typ BM 509.

<sup>1</sup> prof. Ing. Karol Marton, DrSc, Ing. Jaroslav Džmura, PhD., F EI, TU v Košiciach, [Karol.Marton@tuke.sk](mailto:Karol.Marton@tuke.sk), [Jaroslav.Dzmura@tuke.sk](mailto:Jaroslav.Dzmura@tuke.sk)

<sup>2</sup> Ing. Araujo Jose, Fakulta BERG TU v Košiciach, [Araujo.Jose@tuke.sk](mailto:Araujo.Jose@tuke.sk)  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 5. 10. 2004)



Obr. 1. Elektrický model prachových častíc vo vrstvách pri postupnom zjednodušovaní.  
Fig. 1. An electric model of dust particles in layers at consecutive simplification.

$C_{\check{c}}$  - kapacita častíc [ F ],  
 $\gamma_2$  - merná vodivosť častice [  $S \cdot m^{-1}$  ],  
 $C_v$  - kapacita plynovej výplne [ F ],  
 $R_{\check{c}}$  - odpor častíc [  $\Omega$  ],  
 $C_c$  - celková kapacita [ F ],  
 $\gamma_1$  - merná vodivosť častice [  $S \cdot m^{-1}$  ],  
 $\gamma_3$  - merná vodivosť styku častíc [  $S \cdot m^{-1}$  ],  
 $R_p$  - odpor styku [  $\Omega$  ],  
 $C_p$  - kapacita na styku častíc [ F ],  
 $R_c$  - celkový odpor [  $\Omega$  ].

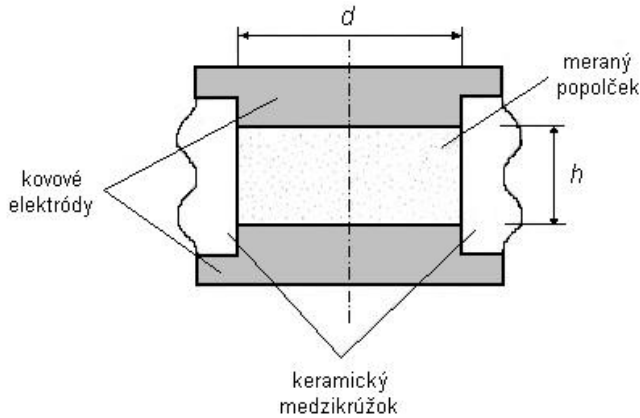
Najčastejšie sa aplikuje vzťah Lorentz – Lorena:

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{\varepsilon_{r1} - 1}{\varepsilon_{r1} + 2} \cdot V_1 + \frac{\varepsilon_{r2} - 1}{\varepsilon_{r2} + 2} \cdot V_2 \quad (1)$$

kde  $\varepsilon_r$  – relatívna permitivita zmesi,  
 $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$  – relatívna permitivita jednotlivých komponentov,  
 $V_1$ ,  $V_2$  – objemové diely jednotlivých komponentov.

Všeobecne používaný trojelektrodový systém má aj ochrannú elektródu, ktorá jednak eliminuje vplyv povrchového zvodu, jednak vymedzuje elektrické pole na obvode meracej elektródy. Tento systém sa používa častejšie v spojitosti s mostíkovými metódami, ktoré umožňujú pripojiť ochranný prstenec. Ďalší, nami použitý dvojelektrodový systém je na obr. 2.

Zvláštnu pozornosť si zasluhuje merací kondenzátor TETTEX, ktorý je určený na meranie permitivity a stratového činiteľa pevných dielektrík. Nakoľko sa v tomto stave pre naše účely nemôže použiť, bolo potrebné upraviť spodnú časť elektródového systému tak, aby táto tvorila lôžko pre meraný prášok. Keďže izolácia elektródového systému bola výrobcom veľmi starostlivo vyhotovená, musela sa táto skutočnosť rešpektovať aj pri konštrukcii lôžka, a preto bol použitý keramický medzikružok s vysokou teplotnou stálosťou (obr. 2).



Obr. 2. Elektroódový systém na meranie práškov s planparalelnými kruhovými elektródami.  
Fig. 2. Dust measurement electrode system with plane – parallel circular electrodes.

Spodná časť lôžka bola zhotovená z vysokoleštenej elektródy. Týmto sa upravila vnútorná časť elektroódového systému tak, aby sme po nasypaní rovnakého objemu prášku dosiahli pri reprodukovateľných meraniach a po pritlačení elektroódového systému ochrannou elektródou na povrchu prášku konštantnú hrúbku meranej vrstvy. Merací kondenzátor je prispôsobený na meranie teplotných závislostí materiálov. Vyhrievacie telesá sú napájané zo siete a teplota sa nastavuje pomocou regulátora teploty firmy TETTEX s presnosťou  $\pm 0,5$  °C. Zvýšená pozornosť bola venovaná vlastnému meraniu. Vyžaduje si to predovšetkým tá skutočnosť, že dodaný prášok je v surovom stave vlhký, čo sa prejavuje nielen pri meraní mernej vodivosti, ale zvlášť je na to citlivá charakteristická veličina – relatívna permitivita. Jej hodnotu vypočítame z pomeru nameranej kapacity  $C$  a kapacity kondenzátora tých istých geometrických rozmerov so vzduchovým dielektrikom. Prášok získaný odberom obsahuje vysoké percento vlhkosti, z toho dôvodu vzorky pri nízkych teplotách teda pred vysušením prášku, majú vysokú hodnotu permitivity. Preto je nutné prášok pred meraním dokonale vysušiť, aby namerané výsledky nevykazovali hysteréziu. Dokonalým vysušením prášku a stabilizáciou pomerov sú výsledky reprodukovateľné. Temperovanie počas jedného merania trvá 2 hodiny pre jednu hodnotu kapacity. Vlastné vyhodnocovanie sa robí podľa vzťahu (Moore) [1]:

$$C = \frac{C_3}{C_4} \cdot C_n \quad [F; F] \quad (2)$$

Pre použitý merací mostík firmy TETTEX sú hodnoty kapacity  $C_3$  a  $C_n$  konštantné a platí:

$$C_3 \cdot C_n = 100.$$

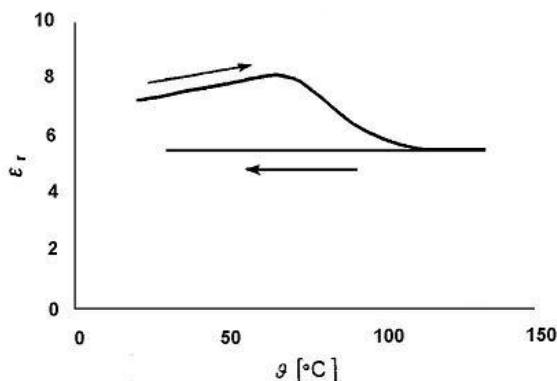
Mostík sa vyvažuje zmenou kapacity  $C_4$ . Potom je možné meranú kapacitu vzorky vypočítať zo vzťahu

$$C = \frac{100}{C_4} \quad [F; F] \quad (3)$$

Hodnotu relatívnej permitivity je možné určiť zo vzťahu uvedeného v popise merania alebo zo vzťahu:

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot h \cdot 4 \cdot \pi \cdot 0,8988}{S} = 0,5647 \cdot C \cdot h \quad (4)$$

Pričom  $C$  - nameraná kapacita [pF],  
 $h$  - hrúbka meraného objektu [cm],  
 $S$  - plocha mernej elektródy v [cm] vo vyššie uvedenom prípade je  $S=20 \text{ cm}^2$ .



Obr. 3. Závislosť relatívnej permitivity na teplote.  
Fig. 3. Dependence of relative permittivity on temperature

Merania sa odporúčajú realizovať metódou "hore-dole" to znamená že za účelom odstránenia vlhkosti sú merané kapacity jednotlivých vzoriek od základnej teploty smerom ku teplote maximálnej: 150 °C. Po jej dosiahnutí je znižovanie teploty pozvoľné a kontrolované, sledované regulátorom teploty. Z dôvodu ustálenia sa teploty v celom objeme meranej

vzorky celý proces merania trvá 24- 36 hodín. Na vzorku bolo pripájané napätie v rozmedzí 100 – 1000 V s krokom 100 V, takže pri každej teplote bolo získaných 10 hodnôt relatívnej permitivity. Tomuto meraniu bolo podrobených všetkých 18 vzoriek. Na obr. 3 je zobrazený príklad závislosť permitivity prášku (Vojany FK1) na teplote.

Vysoká hodnota relatívnej permitivity pri počiatkovej teplote je vyvolaná polárnymi molekulami vody, absorbovanými poréznym práškom (rozmer molekuly vody je  $2,7 \cdot 10^{-10}$  m). Vysušenie vzoriek spôsobuje zmenšenie ich relatívnej permitivity. Samozrejme, že na jej hodnotu má vplyv aj uloženie prachových častíc, ich zrnitosť a geometria.

### Meranie mernej vodivosti prášku

Mernú vodivosť práškov definujeme podobne ako vo fyzike dielektrík, t. j.:

$$\gamma_P = \frac{i}{E} \quad [ \text{S} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A} \cdot \text{m}^{-1}, \text{V} ] \quad (5)$$

Výsledná hodnota vodivosti však závisí nielen od objemového a povrchového odporu, ale aj od kontaktného odporu styčných miest dvoch a viacerých susedných častíc. To samozrejme závisí od zrnitosti a tvaru zrníčok. Pre dosiahnutie reprodukovateľných hodnôt musíme dodržať konštantné hodnoty týchto parametrov:

- hustota uloženia častíc prášku,
- relatívna vlhkosť prostredia,
- teplota,
- intenzita elektrického poľa.

Pri určovaní vnútorného a povrchového odporu treba oddelene merať prúd, ktorý tečie vnútro vzorky a prúd, ktorý tečie po povrchu vzorky. To sa dosiahne vhodným usporiadaním elektród. Aby sa pri výpočte dala jednoducho zohľadniť geometria usporiadania, používajú sa jednoduché tvary.

Metóda merania spočíva v nasypání prášku do meracieho elektródového systému (obr. 4) a meraní jeho odporu. Pri koncentrickom usporiadaní elektród môžeme dostať hodnotu odporu podľa vzťahu (Horváth) [2]:

$$R = \frac{1}{2\pi h_E \gamma_P} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad [ \Omega ] \quad (6)$$

z čoho vodivosť:

$$\gamma_P = \frac{1}{2\pi h_E R} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad [ \text{S} \cdot \text{m}^{-1} ] \quad (7)$$

kde:

$r_2$  - polomer vonkajšej elektródy,

$r_1$  - polomer vnútornej elektródy,

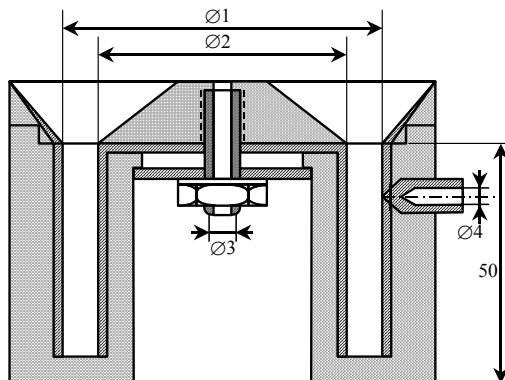
$h_E$  - výška elektród.

Pri zvolení vhodných elektród získame jednoduchý vzorec.

Pre uvedené rozmery na obr. 4 dostávame vzťah:

$$\gamma_P = \frac{1}{R} [ \Omega^{-1} \text{m}^{-1}; \Omega ] \quad \text{resp.} \quad \rho_P = R [ \Omega \text{m}; \Omega ] \quad (8)$$

Obr. 4 Nádoba na meranie mernej vodivosti práškov koaxiálneho varu (Marton, 1974).  
Fig. 4 Coaxial Vessel for the measurement of resistivity of powders.



Merací rozsah je ohraničený konštantou mernej nádoby (t.j. geometrickými rozmermi), jej izolačným odporom, ako aj rozsahom meracieho prístroja. Z vyššie uvedených dôvodov sa používajú veľkoplošné elektródy. Ich rozmery sú však obmedzené objemom stienenej komôrky meracieho prístroja s vysokým vstupným odporom. Prípravok na meranie bol zhotovený z teflonu, až na vonkajšiu elektródu, ktorá bola zhotovená z duralu. Konce elektródy boli ohraničené krúžkami z teflonu, aby nedochádzalo k prípadným deformáciám prúdového poľa a tým k nepresnosti pri meraní.

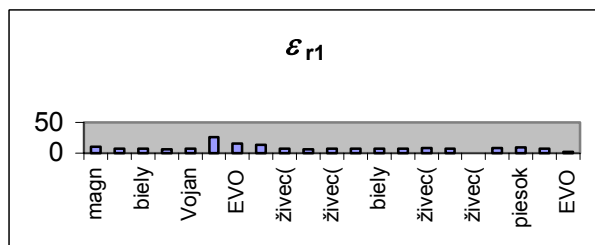
Hodnotu nameraného odporu pomocou terraohmetra dosadíme do výrazu v ohmoch. Meraná nádoba je pripojená

k meraču odporov vysokých a veľmi vysokých hodnôt typu TERALIN III. fy. Statron.

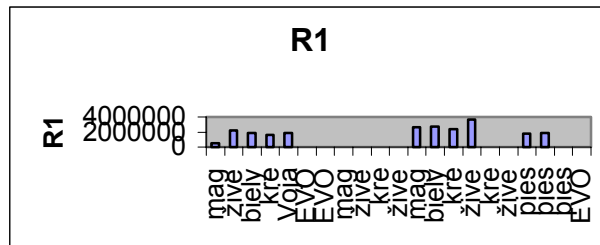
Rozsah:  $10^6$ - $5 \cdot 10^{16} \Omega$  chyba  $\pm 5\%$ ,

Merné napätie:  $U_m = 0,1 \dots 500V$ .

### Rekapitulácia výsledkov merania



Obr. 5. Rozloženie relatívnej permitivity skúmaných práškov.  
Fig. 5. Distribution of relative permittivity of studied powders.



Obr. 6. Odpor vybraných vzoriek kremičitých minerálov.  
Fig. 6. Resistance of selected silicate samples.

Popísané metódy merania kapacít boli vykonané pre niekoľko zložitých sústav práškových kremičitých materiálov.

Zrnitostná charakteristika je nasledujúca:

názov	zrornosť	kremeň(2)	0.71-1
magnezit(2)	0.05-0.315	živec(5)	0.05-0.75
živec(5)	0.05-0.315	magnezit(4)	0.71-1
biely piesok(2)	0.315-0.75	biely piesok(1)	0.05-0.315
kremeň(3)	0.315-0.71	kremeň(1)	0.05-0.315
Vojany FK1/úlet(2)		živec(1)	pod nulou
EVO I. K2 vzorka č. 4 (1)		kremeň(5)	pod nulou
EVO I. vzorka č. 3 (1)		živec(3)	0.71-1
magnezit(3)	0.315-0.71	piesok(1)	0.315-0.71
živec(4)	0.315-0.05	piesok(2)	0.05-0.315
piesok(3)	0.75-1	EVO Vojany vzorka č. 3 (2)	

S ohľadom na rýchlu aplikáciu metódy na priemyselné meranie odporúčame pri využití elektródového systému, znázorneného na obr.č.4 realizovať meranie automatickým univerzálnym mostíkom Tesla BM 509. Dosiagnuté výsledky sú zhrnuté na obr.5.

Univerzálny merací mostík umožňuje aj priame meranie odporu práškov v dvojelektrodovom systéme. Výber z meraní odporu je na obr. 6.

### Záver

Na základe analýzy dielektrických vlastností kremičitých minerálov je možné sa rozhodnúť pre návrh, konštrukciu a stavbu vysokonapäťového lineárneho, prípadne rotačného separátora. Voči látkam z kategórie čistých dielektrických materiálov sa v tomto prípade jedná o látky zložitejších dielektrických vlastností s kombináciou organických a anorganických látok. Vzhľadom na správanie sa makroskopických častíc tohoto druhu so zložitými polarizačnými a vodivostnými vlastnosťami je potrebné s týmto fenoménom počítať, nakoľko sledované práškové médium hraničí svojimi vlastnosťami s látkami polovodivými.

### Literatúra - References

- Moore, A, D.: Electrostatics and its Applications, John Wiley and Sons, New York 1973.  
 Horváth, T., Berta, J., Pohl, J.: Az elektrosztatikus feltöltődések, Muszaki Könyvkiadó Budapest 1984.  
 Marton K.: Príspevok k štúdiu mechanizmu nanášania práškov, Statická elektrina 78,DT České Budějovice 1978.  
 Marton K.: Laboratorné praktikum z elektrotechnických materiálov, ES VŠT Košice, 1974.  
 Marton K.: Štúdium unipolárneho korónového výboja a jeho využitie v raxi, Dokrorská práca, SVŠT Bratislava, 1989.