

Jaroslav Džmura, Jozef Balogh, Jaroslav Petráš

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

Meranie elektrických vlastností makroskopických prímiesí prúdiacich plynov

Abstrakt. Tento príspevok sa zaoberá meraním elektrických vlastností vzoriek popolčeka z tepelných elektrární. Experimenty boli sústredené na meranie relatívnej permitivity, meranie mernej vodivosti a meranie nabíjateľnosti popolčeka. Tieto parametre by mali byť súčasťou vstupných informácií pre návrh odlučovača.

Abstract. The paper deals with measurement of electrical relative permittivity, electrical resistivity and ability to charge itself. They are basic parameters for designing of precipitators. (Measurement of electrical properties of macroscopic particles in flying gas).

Kľúčové slová: meranie elektrických vlastností popolčeka, odlučovanie popolčeka, separácia častíc.

Keywords: measurement of fly-ash electrical properties, fly-ash precipitation, particle separation.

Úvod

Elektrická separácia častíc makroskopickej veľkosti anorganického pôvodu zaujíma z hľadiska technologického ale aj ekologického jedno z predných miest pri tepelnom spracovaní a využití uhlia pre energetické účely. Efektívnosť separácie prirodzene závisí od elektrických vlastností popolčeka. Tieto majú poukázať na základné vstupné informácie potrebné pre návrh odlučovača.

Analýza odlučovaných médií

Elektrické vlastnosti popolčeka sú značne ovplyvnené niektorými ďalšími fyzikálnymi parametrami, ktoré vstupujú do interakcie s popolčekom: je to predovšetkým teplota prostredia, v ktorom sa popolček 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 popolčeka.

Meranie relatívnej permitivity popolčeka

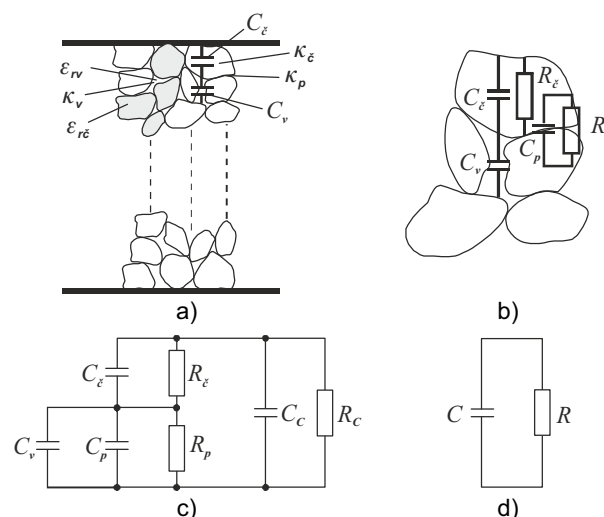
V podstate ide o meranie heterogénneho systému, ktorý sa skladá minimálne z dvoch zložiek: z častíc pevnej fázy (popolček) a z plynu (vzduch). Plyn vyplňuje medzipriestory medzi časticami a zároveň je absorbovaný v tenkej vrstve na povrchu častice. Objemovo a hmotnostne prevláda tuhá fáza nad plynou. Charakter vrstvy a jej vlastností sú určované druhom a fyzikálnymi vlastnosťami popolčeka a plynu, granulometrickým a morfológickým zložením popolčeka a vonkajšími vplyvmi ukladania sa vrstvy a jej stavu.

Pri podrobnej analýze, ak uvažujeme element o hrúbke h a ploche dS môžeme definovať kapacitu častice C_ε , jej elektrický odpor R_ε , kapacitu vrstvy vzduchu C_v , kapacitu prechodu C_p a prechodový elektrický odpor R_p . Po viacnásobných zjednodušeníach dostávame z makroskopického hľadiska postačujúcu náhradu paralelne zapojeného kondenzátora C a odporu R , potom odpor a kapacita bude:

$$(1) \quad R = \rho_{ev} \cdot \frac{h}{S}, \quad C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h}$$

kde: ρ_{ev} – merný odpor vrstvy, ε_r – relatívna permitivita častíc tvoriacich usadenú vrstvu.

Vrstvy popolčeka určené na meranie môžeme znázorniť na obr. 1.



Obr.1. Náhradný obvod vrstvy popolčeka; a) celok; b) detail; c) náhradná schéma; d) zjednodušená náhradná schéma

Relatívnu permitivitu zmesného dielektrika môžeme vypočítať na základe vzťahov, odvodených viacerými autormi. Pri výpočte vychádzali zo zjednodušujúceho predpokladu, že sa jedná o guľovitý tvar častíc a ide o ideálne usporiadanie, prípadne uloženie čiaštočiek. Z literatúry sú známe zmiešovacie pravidlá podľa Lorentz – Lorentza, Wienera, Oehmeho a Lichteneckra. Najčastejšie sa aplikuje vzťah Lorentz – Lorentza:

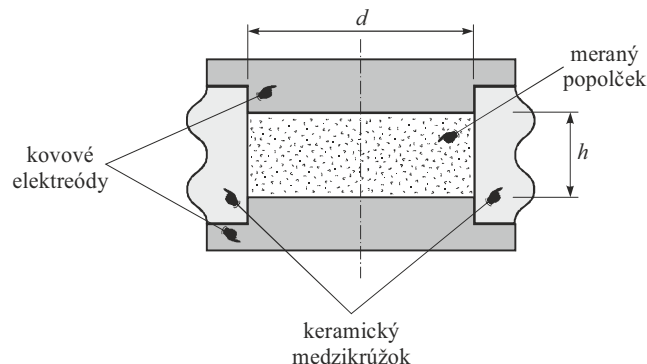
$$(2) \quad \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{\varepsilon_{r1} - 1}{\varepsilon_{r1} + 2} V_1 + \frac{\varepsilon_{r2} - 1}{\varepsilon_{r2} + 2} V_2$$

kde: ε_r – relatívna permitivita zmesi, ε_{r1} , ε_{r2} – relatívna permitivita jednotlivých komponentov, V_1 , V_2 – objemové diely jednotlivých komponentov

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 a regulovateľné napätie 0 –

2000 V. Pri meraní teplotnej závislosti bol použitý merný kondenzátor firmy TETTEX s vnútorným vyhrievaním meranej vzorky.

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 najčastejšie v spojitosti s mostíkovými metódami, ktoré umožňujú pripojiť ochranný prsteneč.



Obr.2. Elektrodový systém na meranie práškov s planoparalelnými kruhovými elektródami

Zvláštnu pozornosť si zasluhuje merací kondenzátor TETTEX typu 2904. Tento je určený na meranie permitivity a stratového činiteľa pevných dielektrík. Nakoľko sa v tomto stave pre účely merania práškov nemôže použiť, bolo potrebné upraviť spodnú časť elektrodového systému tak, aby táto tvorila lôžko pre meraný prášok (obr. 2).

Keďže izolácia elektrodového systému bola výrobcom veľmi starostlivo vyhotovená, musela sa táto skutočnosť rešpektovať aj pri konštrukcii lôžka a preto bol použitý keramický medzokrúžok o vysokej teplotnej stálosti. Spodná časť lôžka bola zhotovená z vysokoleštenej elektródy. Týmto sa upravila vnútorná časť elektrodového systému tak, aby po nasypání rovnakého objemu prášku sme dosiahli pri reprodukováných meraniach a po pritlačení elektrodového systému s ochrannou elektródou na povrchu prášku konštantnú hrúbku meranej vrstvy. Merací kondenzátor je prispôbený na meranie teplotných závislostí materiálov. Vyhrievacie telesá sú napájané zo siete a teplota sa nastavuje pomocou regulátora teploty firmy TETTEX s presnosťou $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Zvýšená pozornosť bola venovaná vlastnému meraniu. Vyžaduje si to predovšetkým tá skutočnosť, že dodaný popolček 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. Vlastné vyhodnocovanie sa robí podľa vzťahu:

$$(3) \quad C = \frac{C_3}{C_4} \cdot C_N$$

Pre použitý merací mostík firmy TETTEX sú hodnoty kapacit C_3 a C_N konštantné a platí: $C_3 \cdot C_N = 100 \text{ F}^2$. Mostík sa

vyvažuje zmenou kapacity C_4 a potom meranú kapacitu vzorky je možné vypočítať zo vzťahu:

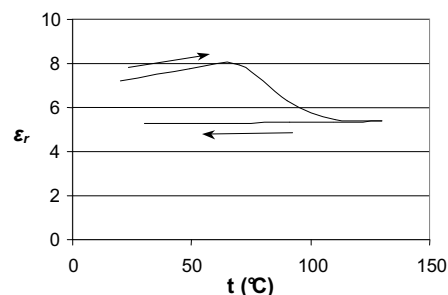
$$(4) \quad C = \frac{100}{C_4}$$

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

$$(5) \quad \varepsilon_r = \frac{C \cdot h \cdot 4\pi \cdot 0,8988}{S} = C \cdot h \cdot 0,5647$$

pričom: C – nameraná kapacita v pF, h – hrúbka meraného objektu v cm, S – plocha mernej elektródy v cm^2 (vo vyššie uvedenom prípade je $S = 20 \text{ cm}^2$)

Merania sa odporúčajú realizovať metódou „hore-dole“, to znamená, že za účelom odstránenia vlhkosti sú merané kapacity jednotlivých vzoriek od základnej teploty smerom k teplote maximálnej: 150°C . Po jej dosiahnutí znižova nie teploty je pozvoľné a kontrolované ako aj sledované regulátorom teploty. Merania boli realizované najprv pri teplote okolia a potom v intervale $30^\circ\text{C} - 130^\circ\text{C} - 3 \text{ }^\circ\text{C}$ s krokom 20°C . Z dôvodu ustálenia sa teploty v celej meranej vzorke sa merací systém stabilizoval pri meranej teplote 15 minút. Po stabilizácii teploty bolo na vzorku pripájané napätie v rozmedzí $100 - 1000 \text{ V}$ s krokom 100 V , takže pri každej teplote bolo získaných 10 hodnôt relatívnej permitivity. Celý proces merania jednej vzorky trval 24 až 36 hodín. Na obr. 3 je zobrazený príklad závislosti permitivity prášku od teploty.



Obr.3. Závislosť relatívnej permitivity prášku od teploty

Vysoká hodnota relatívnej permitivity pri počiatkovej teplote je vyvolaná polárnymi molekulami vody, absorbovanými poréznym práškom (rozmer molekuly vody je $2,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$). 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 popolčeka

Ďalšou z výpovedeschopných veličín, charakterizujúcich kvalitu odlučovania klasickou metódou je merný odpor popolčeka. Z fyzikálneho hľadiska sa častejšie používa termín merná (tiež špecifická) vodivosť.

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

$$(6) \quad \kappa = \frac{i}{E}$$

kde: i – prúd, E – intenzita elektrického poľa.

Výsledná hodnota vodivosti však závisí nielen od objemového a povrchového odporu, ale aj od kontaktného odporu styčných miest dvoch a viacerých susedných častíc. To však závisí od zrnitosti a od tvaru zrníčok. Za účelom

dosiahnutia reprodukovateľných hodnôt musia byť dodržané konštantné hodnoty týchto parametrov:

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

Pri určovaní vnútorného a povrchového odporu je potrebné oddeliť merať prúd, ktorý tečie vnútorom 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.

Merania boli realizované v dvoch typoch elektródových systémov:

- a) meracia nádobka koaxiálneho tvaru (koncentrické usporiadanie elektród),
- b) meracia nádobka s planoparalelnými kruhovými elektródami.

Pre popolček o vyššej hodnote merného odporu (nad $10^6 \Omega m$) sa aplikuje koaxiálny tvar nádobky obr. 4.

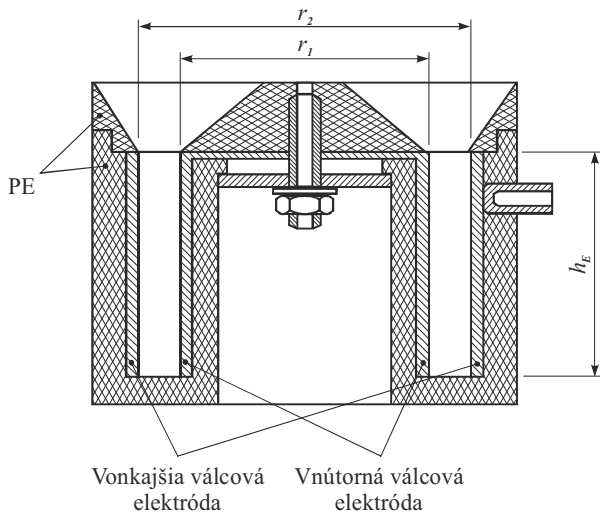
Metóda spočíva v nasypaní prášku do meracej nádobky a v meraní jeho odporu. Pri koncentrickom usporiadaní elektród môžeme dostať hodnotu podľa vzťahu:

$$(7) \quad R = \frac{1}{2\pi h_E \kappa} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

z čoho vodivosť:

$$(8) \quad \kappa = \frac{1}{2\pi h_E \cdot R} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

kde: R – odpor odmeraný prístrojom, r_2 – polomer vonkajšej elektródy, r_1 – polomer vnútornej elektródy, h_E – výška elektród.



Obr.4. Nádoba na meranie mernej vodivosti práškov koaxiálneho tvaru

Merací rozsah je ohraničený konštantou mernej nádobky (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 tienenej 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.

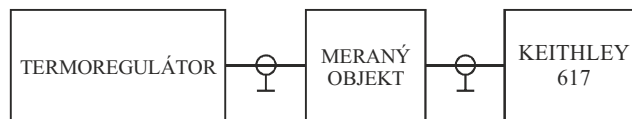
V priebehu merania sme konštatovali, že aj napriek vysokej tepelnej stabilite meracej nádoby jej nevýhoda spočíva v tom, že je problematické udržať konštantný tlak pôsobiaci na prášok za účelom stabilného styku zrníčok pri opakovaných meraniach, čím sa reprodukovateľnosť výsledkov zhoršila. Rozmery (geometria) systému neumožňovali rovnomerný ohrev prášku v termostatomom zariadení TETTEX. Nevýhody tohto usporiadania boli odstránené voľbou elektród podľa bodu b.

Optimalizáciou elektródového systému v prípade kruhových elektród v planoparalelnom usporiadaní bol vyvinutý pre prášky s nízkym merným odporom merný objekt, v prípade ktorého bolo možné stanoviť mernú vodivosť na základe vzťahu

$$(9) \quad \kappa = \frac{1}{R} \cdot \frac{h}{S}$$

kde: R – odpor nameraný meracím prístrojom, h – hrúbka masy popolčeka, S – prierez protifaľých elektród.

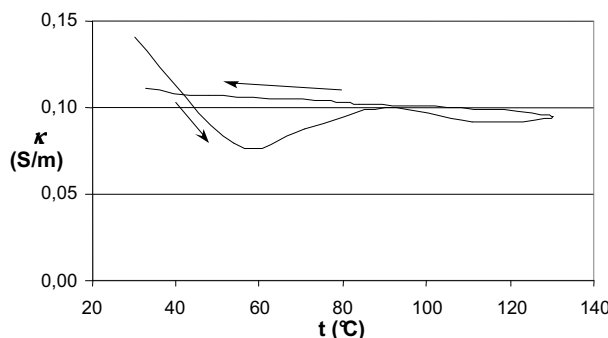
Bloková schéma meracieho zariadenia je na obr. 5.



Obr.5. Bloková schéma zariadenia na meranie teplotnej závislosti odporu prášku

Meraný objekt pozostával z prášku, ktorý bol umiestnený v elektródovom systéme podľa obr. 2 a tento bol vložený medzi elektródy meracieho kondenzátora firmy TETTEX. Celý merací kondenzátor bol vyhrievaný vyhrievacími telesami regulovanými pomocou termoregulátora. Odpor vzorky prášku bol meraný meracím prístrojom KEITHLEY typu 617. Tento bol zapojený pre meranie V-A charakteristík z dôvodu možnosti regulácie napätia.

Merania boli realizované pri teplotách 30 – 130°C v intervaloch po 20°C pri nízkych napätiach, kvôli to mu, aby nedošlo k vytváraniu vodivých kanálikov (ionizované mikroobjemy), ktoré by skresľovali výsledky, ak by napätie prekročilo kritickú hodnotu.



Obr.6. Závislosť mernej vodivosti prášku od teploty

Termoregulátorom bola nastavená požadovaná teplota. Po ustálení teploty v celej vzorke bolo uskutočnených päť meraní pri rôznych napätiach (0,05 – 5 V), z ktorých sa odčítaval odpor meranej vzorky. Merná vodivosť sa vypočíta podľa vzťahu (9). Jeden z mnohých nameraných priebehov je zobrazený na obr. 6. Z priebehu vyplýva, že po prekročení teploty 90°C sa vodivosť κ popolčeka ustálila a pri chladnutí vzorky bola skoro konštantná.

Meranie nabíjateľnosti popolčeka

Z predchádzajúcich kapitol vyplýva, že hladina hodnoty mernej vodivosti κ , prípadne hodnota odporu R reálnej vrstvy a jej relatívna permitivita určuje aj nabíjateľnosť prášku. V prípade nízkej hodnoty merného odporu dochádza z hľadiska časového k prudkému odvedeniu náboja z povrchu makroskopicky veľkej častice, čo sa dá vyjadriť závislosťou exponenciálneho charakteru s negatívnym exponentom. Táto skutočnosť viedla k návrhu nového spôsobu merania nabíjateľnosti.

Prášok nesúci elektrický náboj padá do nádoby z vodivého materiálu cez úzky otvor. Táto nádoba je umiestnená v ďalšom kryte, s ktorým vytvára kapacitný útvar. Elektricky nabité častice vyvolávajú v dôsledku influencie náboj, ktorý je možné merať nami skonštruovaným prístrojom. Zariadenie je na obr. 7.

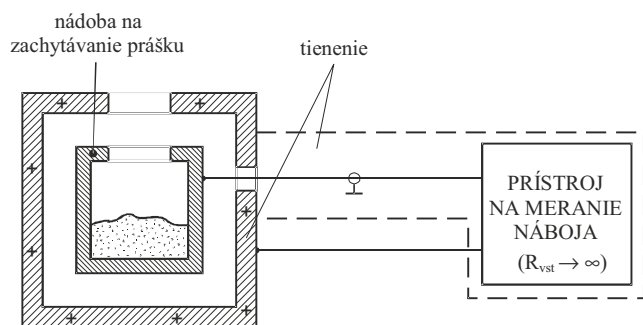
Pri známej kapacite zariadenia je možné náboj pri definovanom napätí voči zemi presne stanoviť podľa vzťahu:

$$(10) \quad Q = C \cdot U$$

kde Q – množstvo náboja v prášku, C – celková kapacita (kapacita nádoby + kapacita vodičov + prídavná kapacita), U – napätie na mernom kondenzátore,

Prachové častice z jednotlivých dokonale vysušených vzoriek boli vsypávané do merného kondenzátora po kovovom transportnom vodičku, čím bolo zabránené vzniku parazitných elektrostatických nábojov. Doba vsypávania častíc sa odporúča 5 sekúnd a musí byť udržiavaná na konštantnej hodnote.

Na meranie náboja práškových častíc bol použitý merný kondenzátor, ktorý pozostáva z dvoch valcov sústredne uložených. Veľká vnútorného valca tohto kondenzátora sú vyrobené tak, že sa dajú na valec voľne naskrutkovať. Na vrchnom veku je v strede otvor na unikanie prebytočného vzduchu. Na spodnom veku je na tomto mieste vyrobený strediaci kolík. Vonkajší valec merného kondenzátora je pevne pripevnený k drevenej podložke, od ktorej je odizolovaný teflonovými izolačnými podložkami. Vnútorň valec zapadá pomocou strediaceho kolíka do otvoru vyvrtaného v teflonovej izolačnej podložke, ktorá je v strede vonkajšieho valca. Tým je valcový kondenzátor dokonale vystrednený. Meraním na kapacitnom mostíku pri rôznych frekvenciách bola zistená kapacita merného kondenzátora o hodnote $C = 167$ pF.



Obr.7. Bloková schéma zariadenia na meranie teplotnej závislosti odporu prášku

Namerané napätie na mernom kondenzátore bolo v rozsahu 10 – 100 mV, z čoho pri použití rovnice (10)

vyplýva, že náboj získaný popolčekom pri vsypávaní do merného kondenzátora bol v rozsahu 1,67 – 16,7 pC.

Znamienko nábojov, vznikajúcich na povrchu stýkajúcich sa látok sa vo väčšine určovalo experimentálne, my sme použili prístroj s nulou uprostred kde bolo jasné akej polarity je náboj. Mnohí autori vypracovali súpis izolačných látok na základe skúmania ich elektrofyzikálnych vlastností, v dôsledku čoho vznikne takzvaný elektrizačný rad. Látky boli usporiadané podľa veľkosti a znamienka ich kontaktného potenciálu pri trení s oceľou. Pretože sklon k separácii nábojov a polarita závisí od kontaktného potenciálu oboch látok, môžeme povedať: materiály na koncoch radu vykazujú výrazný sklon nabíjať sa kladne alebo záporne; materiály v strede tabuľky sa nabíjajú slabšie, polarita je nevykázaná.

V elektrizačnom rade sú zoradené pevné látky do poradia podľa znamienka, ktoré získali pri elektrizácii trením. Na kladnom konci radu je látka, ktorá sa všetkými ostatnými látkami radu nabíja kladne, na zápornom konci záporne. Látky vo vnútri radu sa chovajú navzájom ku seba tak, že pri trení látka stojaca bližšie ku kladnému koncu sa nabíja kladne, ďalej stojaca záporne. Túto schopnosť nazývame elektropozitívou resp. elektronegativitou práškových látok.

Záver

Na základe analýzy dielektrických vlastností uhoľného prachu je možné sa rozhodnúť pre návrh, konštrukciu a stavbu vysokonapäťového odlučovača. Voči látkam z kategórie čistých dielektrických materiálov sa v tomto prípade jedná o látky zložitejších dielektrických vlastností s kombináciou organických a anorganických látok.

Literatúra

- [1] Džmura, J.: Nabíjateľnosť a transport častíc makroskopické veľkosti v silne nehomogénnom elektrickom poli. Dizertačná práca, TU FEI Košice 2002.
- [2] Marton, K., Araujo, J., Džmura, J.: Meranie elektrických vlastností kremičitých minerálov. In: Acta Montanistica Slovaca. - ISSN 1335-1788. - Roč. 9, č. 1 (2004), s. 113-117.
- [3] Moore, A. D.: Electrostatics and its Applications, John Wiley and Sons, New York 1973
- [4] Marton, K.: Príspevok k štúdiu mechanizmu nanášania práškov, Statická elektra 78, DT České Budejovice 1978, str. 27-38
- [5] Parker, K. R.: Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, London 1997
- [6] Lloyd, D. A.: Electrostatic precipitator handbook, J W Arrowsmith Ltd., Bristol 1988
- [7] Böhm, J.: Elektrické odlučovače, SNTL Praha, 1977

Autori článku vyslovujú poďakovanie za účinnú podporu grantovej agentúry MŠ SR a SAV v rámci výskumu na úlohe 1/0368/09.

Autori:

Jaroslav Džmura, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.dzmura@tuke.sk.

Jozef Balogh, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jozef.balogh@tuke.sk.

Jaroslav Petráš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.petrash@tuke.sk.