

Prednosti a nevýhody elektrických metód merania obsahu vody v sypkých materiáloch.

Rýchlo napredujúci rozvoj priemyselnej automatizácie požaduje stále presnejšie a spoľahlivejšie meracie systémy vlhkosti, ktorými je možné merať v reálnom čase a nedeštrukčne obsah vody (absolútna vlhkosť) v rôznych materiáloch alebo výrobkoch. Popri požiadavkách na presnosť, ktorá sa podľa aplikácie pohybuje do jedného percenta, je požadovaná aj jednoduchá montáž, hlavne v existujúcich zariadeniach. Aj keď existuje celá rada meracích princípov, ktoré by mali teoreticky bezchybne fungovať v praxi sa často objavujú extrémne nedostatky. Problémy vyplývajú hlavne z nehomogenity materiálu, znečistenia elektrolytu (iónová vodivosť vody) a rozličných tvarov a rozmerov sypkých materiálov.

Meracie princípy:

Na meranie vlhkosti sa môže použiť každá fyzikálna veličina, ktorá sa chová rozlične vzhľadom na meraný materiál a vodu, to zn. ktorých hodnota sa mení aspoň v jednom parametre. Do úvahy pripadajú nasledovné parametre: merná hmotnosť, merná tepelná kapacita, tepelná vodivosť, teplota varu, dielektrická konštanta, dielektrické straty, ...

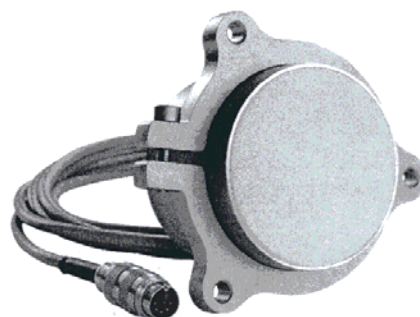
Najväčšie možnosti použitia sa našli pre tie sondy vlhkosti, ktoré využívajú rozdielne dielektrické konštanty sypkých materiálov a vody. Pri týchto „kapacitných sondách vlhkosti“ sa využíva meraný materiál ako dielektrikum meranej kapacity.

Pred niekoľkými rokmi boli na trhu ponúkané tzv. „mikrovlnné sondy“, ktoré využívali mikrovlnnú absorpciu vody (mikrovlnné straty, princíp mikrovlnnej rúry). Na dosiahnutie rovnakej presnosti ako pri kapacitných snímačoch sa vyžadujú (vyššie náklady) vyšší výkon (napr. na korekciu rozptylu).

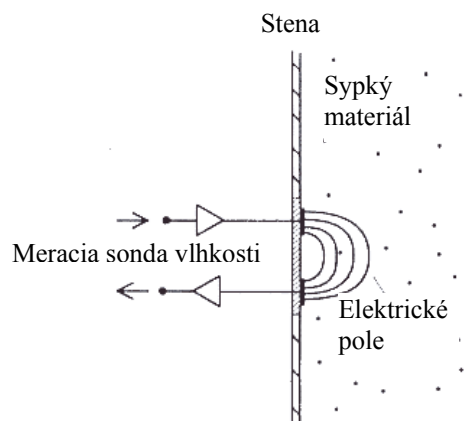
1. Kapacitný snímač vlhkosti.



Obr. 1:
kapacitný snímač
vlhkosti
Výrobca: ARNOLD



Obr. 2: Kapacitná sonda vlhkosti
(schematicky)



Na obr. 1 je zobrazený typický zástupca týchto sond.

Na obr. 2 je typické použitie kapacitného snímača vlhkosti, ktorý tu je zapustený do rúry.

Z dôvodu zabránenia kryštalizácie a korózie na elektródach, sú tieto potiahnuté termoplastom. Meranie sa vykonáva striedavým prúdom. Vzhľadom na to, že dielektrické konštanty vody ($\epsilon_v = 80$) a sypkého materiálu (napr. kremeň $\epsilon_k = 4,5$) sú veľmi rozdielne, môžeme vyrátať pomer zmesy oboch materiálov. Výsledkom je stredná dielektrická konštanta ϵ_s média. Pri homogénnej sypkej zmesy (v tomto prípade neuvažujeme s obsahom vzduchu) môžeme vyrátať ϵ_s ako strednú hodnotu oboch materiálov (ϵ_v a ϵ_k), vždy vzhľadom na množstvo jednotlivých materiálov.

$$\frac{V_v}{V} \quad \text{a} \quad \frac{V_k}{V} \quad (V = V_v + V_k)$$

$$\epsilon_s = \frac{V_v}{V} \cdot \epsilon_v + \frac{V_k}{V} \cdot \epsilon_k \quad 1.)$$

Pre vlhkosť V platí:

$$F = \frac{V_v \cdot \delta_v}{V_k \cdot \delta_k} \quad 2.)$$

δ_v resp. δ_k je merná hmotnosť vody resp. sypkého materiálu
($\delta_v = 1 \text{ g / cm}^3$, napr. kremík $\delta_k = 2,6 \text{ g / cm}^3$). V tomto prípade dostaneme:

$$V_v = V_k \cdot F \cdot \frac{\delta_k}{\delta_v} \quad 3.)$$

$$V = V_v + V_k = V_k \cdot F \cdot \frac{\delta k}{\delta v} + V_k = V_k \cdot \left(F \cdot \frac{\delta k}{\delta v} + 1 \right) \quad 4.)$$

Z tohto vyplýva:

$$\epsilon_s (F) = \frac{F \cdot \frac{\delta k}{\delta v} \cdot \epsilon_v + \epsilon_k}{F \cdot \frac{\delta k}{\delta v} + 1} \quad 5.)$$

Tento vzorec vykazuje vždy dostatočnú linearitu (pre $F < 20\%$), ktorá je optimalizovaná snímačmi vlhkosti ARNOLD (špeciálnym tvarom a umiestnením elektród).

Pri vzorci 5.) je potrebné poznamenať, že $\epsilon_v = 80$ platí presne iba pri $f = \text{cca } 1 \text{ GHz}$. Pri vyšších frekvenciách ϵ_v klesá, čím sa zvyšuje zamedzovanie polarizácii

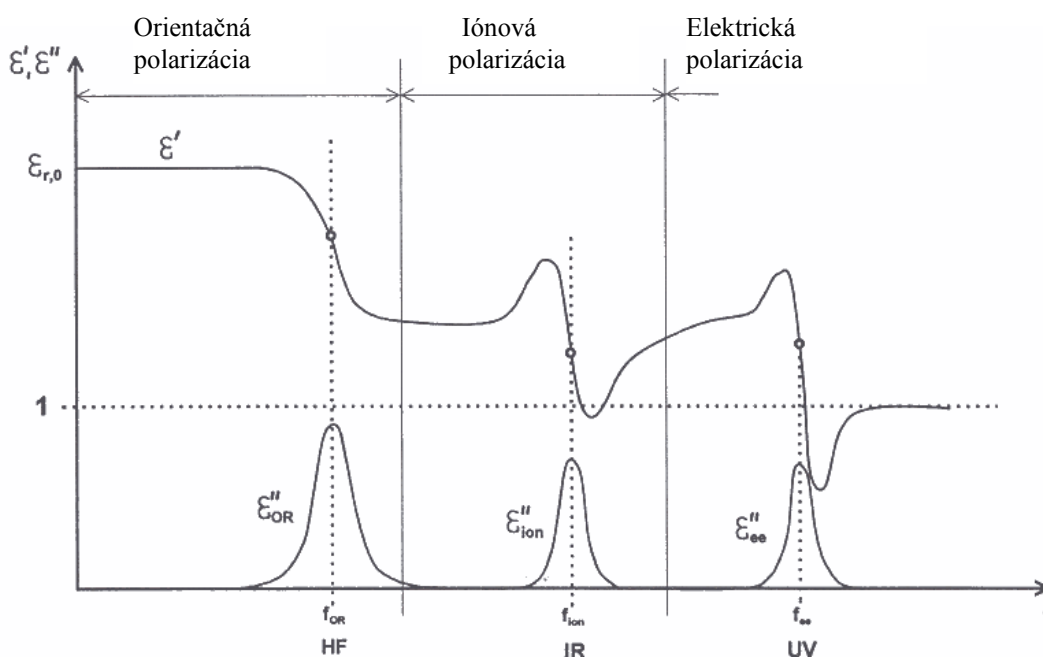
H_2O -dipólových molekúl. ϵ_v vykazuje taktiež tepelný priebeh, ktorý sa musí elektronicky kompenzovať. Materiály, ktorých molekuly nemajú dipólový moment (ako väčšina sypkých materiálov), u ktorých sa môžu ióny a elektróny oproti sebe iba posunúť (translačná polarizácia), sú väčšinou bez takýchto obmedzení (tepelný koeficient).

ϵ_s ako aj δk a δv môžeme vo väčšine prípadov považovať za konštantné.

Na obr.3 sú zobrazené závislosti reálnej a komplexnej časti (ϵ' a ϵ'') komplexnej dielektrickej konštanty ϵ od frekvencie pre rozdielne polarizačné mechanizmy.

Známy je stratový faktor: $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$.

Obr. 3:



Znečistenie elektrolytmi.

Vždy, keď sa menia potenciály $U(t)$ medzi elektródami, preteká prívodmi prúd $I(t)$ zodpovedajúci:

$$C_M = \frac{Q(t)}{U(t)} = \frac{Q^*(t)}{U^*(t)} = \frac{I(t)}{U^*(t)} \quad \alpha \quad (6.)$$

$$I(t) = C_M \cdot U^*(t) \quad (7.)$$

C_M je kapacita média a vyráta sa nasledovne:

$$C_M = \epsilon_M \cdot C_{VA} \quad (8.)$$

C_{VA} je „kapacita vákua“ rozostavených elektród, čiže keď sa pred elektródami nenachádza médium.

Rovnica 7. umožňuje určenie C_M pomocou merania prúdu tečúceho prívodmi a stanovenie vlhkosti F rovnicami 8. a 5.

Prúd tečie nielen prívodmi, ale aj dielektrikom. Keď sa napríklad zvýši napätie na elektródach, vzrastie aj elektrické pole, H_2O -dipóly sa natočia viac v smere poľa a vzrastie polarizácia média. Pri médiách znečistených (odlúčené soli) dodatočnými iónmi (napr. Ca^{2+} , SO_4^{2-}), ktoré elektrické polia „cítia“ sa tieto soli podieľajú na transporte prúdu. Tento iónový prúd je však veľmi nežiadúci, pretože sa prekrýva s dielektrickým posuvným prúdom a skresľuje meranie. Pre slabé elektrolytické rozpúšťanie platí celkom presne Ohmov zákon:

$$I_{SOE} = \frac{I}{R_M} \cdot U(t) \quad (9.)$$

Ak porovnáme rovnicu 7. a 9., spoznáme jednoduché riešenie tejto dilemy:

Pretože dielektrický polarizačný prúd závisí od $U^*(t)$, avšak iónový prúd závisí od $U(t)$, možno potlačiť vplyv posledného použitím vhodných opatrení.

Z:

$$U(t) = \sin \omega t$$

dostaneme:

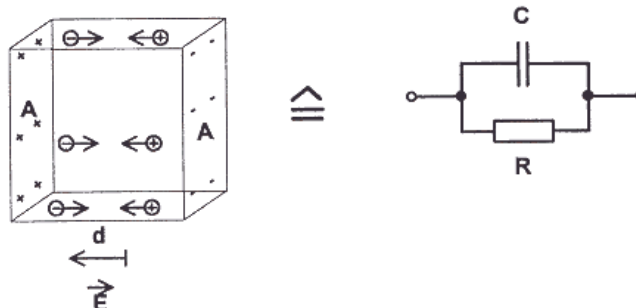
$$U^*(t) = \omega \cdot \cos \omega t$$

to zn. amplitúda $U^*(t)$ je o činiteľ ω väčšia ako amplitúda $U(t)$. Aby sme mohli odhadnúť minimálnu frekvenciu f_g , kedy majú obidva prúdy rovnakú hodnotu, uvažujme s malou kockou, ktorú umiestnime niekde v médiu tak, aby jej strany boli paralelné k siločiaram elektrického poľa (obr. 4).

Obr. 4:

Pre iónový prúd platí:

$$R_M = \rho_M \cdot \frac{d}{A}$$



p_M je špecifický odpor média, d je dĺžka strany, A je plocha rezu kocky.
Pre dielektrický posuvný prúd platí:

$$C_M = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_M \cdot \frac{A}{d} \quad 11.)$$

ε_0 je dielektrická konštanta.

Obidva prúdy majú očividne rovnakú hodnotu, keď platí:

$$\frac{1}{\omega \cdot C_M} = R_M \quad 12.)$$

$$\alpha_{fg} = \frac{1}{2\pi \cdot R_M \cdot C_M} \quad 13.)$$

$$fg = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_M \cdot p_M} \quad 14.)$$

Ak predpokladáme, že sypké častice nie sú vodivé, platí aproximácia s rovnicami 3. a 4.:

$$p_M = p_V \cdot \frac{V}{F \cdot \frac{\delta_K}{\delta_V} + 1} = p_V \cdot \frac{\delta_K}{F \cdot \frac{\delta_K}{\delta_V}} \quad 15.)$$

p_V ešte nie je bližšie definované. Odkiaľ sa dostanú ióny do vody? Aj zdanlivo čistá dažďová voda môže dnes obsahovať relatívne vysokú koncentráciu iónov spôsobenú znečistením ovzdušia (kyslé dažde). V súčasnosti je na mnohých miestach nameraná hodnota pH = 4. Podľa definície ako dekadický logaritmus H_3O^+ iónovej koncentrácie dostaneme špecifický odpor:

$$p_{\text{dážd}} = 350 \, \Omega m$$

Morská voda obsahuje 3,5% NaCl a jej špecifický odpor je približne:

$$p_{\text{MORSKÁ VODA}} \approx 0,2 \, \Omega m$$

Tvrdá voda v rozvodnej sieti s koncentráciou zemných alkalických iónov (Ca^{2+} , Mg^{2+} , ...) viac ako $3 \cdot 10^3$ mol/l má:

$$p_{\text{TVRDÁ VODA}} \approx 16 \, \Omega m$$

Mäkká voda v rozvodnej sieti obsahuje omnoho menej iónov a pre ňu platí:

$$p_{\text{MÄKKÁ VODA}} \approx 80 \, \Omega m$$

Pre destilovanú vodu môžeme uvažovať:

$$\rho_{\text{DESTILOVANÁ VODA}} \approx 10^5 \Omega\text{m}$$

Tieto uvedené hodnoty samozrejme podliehajú veľkému rozptylu a poukazujú iba na numerické hodnoty. Keď teraz skombinujeme rovnice 5., 14. a 15. dostaneme nakoniec:

$$f_g = (2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_v \cdot (\epsilon_v + \frac{1}{F \cdot \frac{\delta_K}{\delta_v}} \cdot \epsilon_K))^{-1} \quad 16.)$$

Na obr. 5 je tabuľka hraničná frekvencia f_g pri štyroch rôznych hodnotách vlhkosti pre rozličné elektrolytické kvapaliny.

Sypkým materiálom je kremičitý piesok ($\delta_K = 2,6 \text{ g/cm}^3$, $\epsilon_K = 4,5$), $t = 18^\circ\text{C}$.

Obr. 5:

F	5%	10%	15%	20%	t = 18°C
$\rho_v = 0,2 \Omega\text{m}$	480 MHz	920 MHz	980 MHz	1,0 GHz	morská voda
$\rho_v = 16 \Omega\text{m}$	9,8 MHz	12 MHz	12 MHz	13 MHz	tvrdá sieťová voda
$\rho_v = 80 \Omega\text{m}$	2,0 MHz	2,3 MHz	2,5 MHz	2,5 MHz	mäkká sieťová voda
$\rho_v = 350 \Omega\text{m}$	450 kHz	530 kHz	560 kHz	580 kHz	dažďová voda
$\rho_v = 10^5 \Omega\text{m}$	1,6 kHz	1,8 kHz	2,0 kHz	2,0 kHz	destilovaná voda

Pretože sú oba prúdy pri najnižšej frekvencii f_g rovnako veľké, je chyba pri stanovení obsahu vody samozrejme veľmi veľká - asi 41%. So zvyšovaním frekvencie sa chyba podstatne znižuje a je asi 12% pri $2f_g$ a 5% pri $3f_g$. Vhodnou voľbou meracej frekvencie môžeme u kapacitných sondách vlhkosti pri väčšine aplikácií potlačiť vplyv iónovej vodivosti, čím dosiahneme vysokú presnosť merania.

Vplyv veľkosti zrna sypkých materiálov.

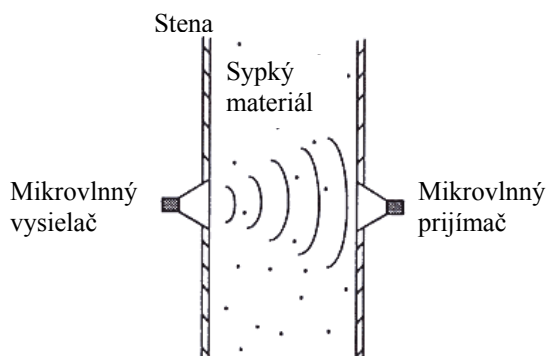
Až doteraz sme predpokladali, že sypký materiál je rovnomerne rozmiešaný, čiže na každom mieste má vlhkosť rovnakú hodnotu, avšak z dôvodu zrnitosti média to nie je možné. Pokiaľ ide o negatívny vplyv zrnitosti, ten závisí od vzťahu medzi veľkosťou zrna a sond, príp. plochy elektród. Pri nastavení elektród na nehomogénne pole máme tiež príjem cez celé pole, ale sa uskutočňuje s rozdielnymi hodnotami v poli. Médium je najviac polarizované tam, kde je najsilnejšie elektrické pole - zvyčajne bezprostredne pri elektródach. Nehomogenita média je tu najviac pozorovateľná. Pokiaľ je veľkosť zrn menšia ako rozmer elektródy, vplyv veľkosti zrn je zanedbateľný.

Mikrovlnná sonda vlhkosti.

Pokiaľ sa funkcia kapacitnej sondy vlhkosti riadi elektrostatickými zákonmi, čiže vplyv elektromagnetických vln môžeme zanedbať, pri mikrovlnných sondách vlhkosti je to opačne. Pre meranie sa musia presne riešiť Maxwellove rovnice, čo je však pre zrnité sypké materiály veľmi zložité.

Namiesto toho sa pokúsime presne odhadnúť správanie pri zjednodušených predpokladoch. Na obr. 6 je typická aplikácia mikrovlnnej sondy.

Obr. 6: Mikrovlnná sonda
(schématicky)

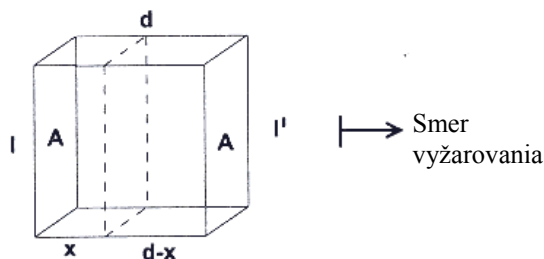


Mikrovlnný vysielač s hornovou anténou vyžaruje lineárne polarizované vlny ($f > 1 \text{ GHz}$), ktoré prechádzajú meraným médiom, pričom stráca rozdielne množstvo energie v závislosti od množstva vody. Mikrovlnný prijímač meria zoslabenú intenzitu mikrovlnného žiarenia a z tohto stanovuje vlhkosť F . Útlm mikrovlnných vln je bezprostredným dôsledkom vysokých dielektrických strát vplyvom vody (funkcia $\epsilon''_{\text{OR}}(f)$ na obr.3), ktoré dosahujú maximum pri $f_{\text{OR, H}_2\text{O}} \approx 18 \text{ GHz}$. Pretože tu ide o rovnaký princíp ako pri mikrovlnnej rúre, je potrebné dávať pri vyšších výkonoch pozor (radiácia)! Na vypočítanie zoslabenej mikrovlnnej vlny dajme opäť niekde do meraného média malú kocku (obr.7). Strany kocky sú paralelné k smeru šírenia. Kocka je tak malá, že elektromagnetická vlna ju môže považovať za rovinu (konštantný smer šírenia). Ak I príp. I' je intenzita vlny pred, resp. po prechode kockou, platí zákon absorpcie:

$$I' = I \cdot e^{-\alpha_M \cdot d} \quad (17.)$$

d je hrúbka kocky a α_M je stredný koeficient absorpcie média.

Obr. 7:

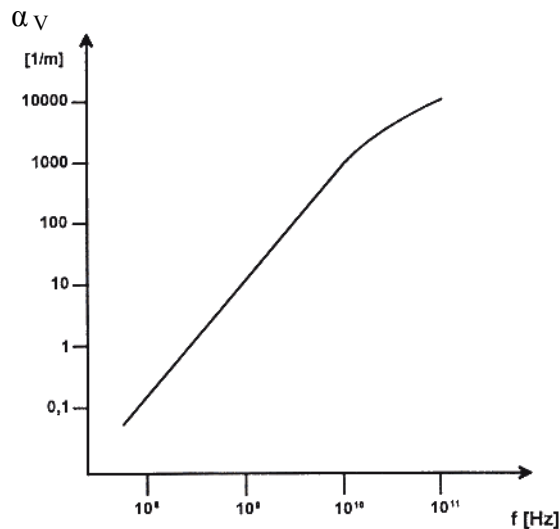


V prípade, že dielektrické straty častíc sypkého materiálu sú v porovnaní s vodou zanedbateľné, potom vidíme aj bez výpočtu, že v mysli môžeme obidva rozdielne materiály oddeliť, ako je naznačené na obr. 7. Nakoniec ide o efektívnu vrstvu vody, cez ktorú musí prejsť mikrovlnné žiarenie, pričom v tomto momente považujeme médium za homogénne. Potom dostaneme rovnicu 17:

$$I'' = I \cdot e^{-\alpha_v \cdot x} \quad (18.)$$

x je hrúbka efektívnej vrstvy vody. Koeficient absorpcie vody α_v je veľmi závislý od frekvencie, priebeh koeficientu α_v je zobrazený na obr. 8:

Obr. 8:



x je samozrejme hodnota vlhkosti F . S rovnicou 2. dostaneme:

$$F = \frac{V_v \cdot \delta_v}{V_k \cdot \delta_k} = \frac{A \cdot x \cdot \delta_v}{A \cdot (d - x) \cdot \delta_k} = \frac{x}{d - x} \cdot \frac{\beta_v}{\delta_k} \quad (19.)$$

$$\alpha_x = \frac{d \cdot F}{F + \frac{\delta_v}{\delta_k}} \quad (20.)$$

Pre $F < 20\%$ je x v prvom priblížení lineárne v F a môžeme napísať:

$$x \approx k \cdot F \quad (21.)$$

k je konštanta proporcionality. Nakoniec dostaneme:

$$I''(F) \approx I \cdot e^{-\alpha_v \cdot k \cdot F} \quad (22.)$$

Hlavnou nevýhodou mikrovlnného systému je, že vzťah 22. je jasne nelineárny (porovnateľný s krivkou vybíjania kondenzátora!) a pri veľkých vlhkostiach F dochádza k nasýteniu!

Rovnicu 22. môžeme s nevelkou námahou linearizovať, avšak to nemení nič na skutočnosti, že relatívna chyba merania sa pri vysokých hodnotách vlhkosti veľmi zväčšuje.

Znečistenie elektrolytmi.

Mikrovlnné sondy sú tiež citlivé na vylúčené soli v sypkých materiáloch. ktoré znižujú špecifický odpor média. Pri prechode elektromagnetickej vlny vlhkým a vodivým médiom je elektrické striedavé pole vynútené nielen stratami polarizačnej orientácie H_2O - dipólovými molekulami, ale je dodatočne vytvárané aj elektrickým prúdom, ktorý samozrejme odoberá vlnu energiu a indikuje neexistujúci vyšší obsah vlhkosti. Pri kapacitných sondách vlhkosti iónovému prúdu konkuruje dielektrický prúd posunu a pri mikrovlnných sondách sa tu deje to isté, ale vzhľadom na výkonové straty. Aby sme mohli porovnať obidva mechanizmy strát, musíme určiť koeficient absorpcie α_{io} , ktorý je zapríčinený ohmickou vodivosťou média. Pre homogénne média sa dá α_{io} ľahko odhadnúť. Po spojení dvoch Maxwellových rovníc dostaneme známu telegrafickú rovnicu:

$$\text{div grad } E = \frac{1}{c^2} \cdot E^{**} + \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_M \cdot p_M \cdot c^2} \cdot E^* \quad (23.)$$

Pre $p_M = \infty$ prechádza telegrafná rovnica v rovnicu vlnovú. C je rýchlosť svetla vo vlhkom médiu. Rovnica 23. je riešená napr. pri sínusovej vlně postupujúcej v smere x , hladkej a tlmenej:

$$E = E_0 \cdot e^{i(\omega t - kx) - \delta x} \quad (24.)$$

k je vlnový vektor, E_0 je sila poľa nestlmenej vlny. Keď to dosadíme do rovnice 23., potom pre frekvencie $f > f_g$ (rovnica 14) dostaneme:

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_M \cdot p_M \cdot c} \quad (25.)$$

Pretože je intenzita vlny proporcionálna k^2 , tak potom je pokles dvakrát rýchlejší ako pri E . Preto platí:

$$\alpha_{io} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_M \cdot p_M \cdot c} \quad (26.)$$

Za ϵ_M a p_M môžeme dosadiť rovnice 5. a 15. a dostaneme s

$$C = (\mu_0 \cdot \mu_M \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_M)^{-1/2}$$

(μ_0 resp. μ_M je relatívna resp. absolútna konštanta indukčnosti) a $\mu_M \approx 1$:

$$\alpha_{io} = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_M} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{p_M} = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \cdot \frac{F \cdot \frac{\delta_K}{\delta_V}}{\left(F \cdot \frac{\delta_K}{\delta_V} + 1 \right)^{1/2} \cdot \left(F \cdot \frac{\delta_K}{\delta_V} \cdot \epsilon_V + \epsilon_K \right)^{1/2}} \cdot \frac{1}{p_V} \quad (27.)$$

α_{io} sa zväčšuje s rastúcou vlhkosťou F. Pre dobré meranie musíme požadovať:

$$\alpha_{io} \ll \alpha_V \quad (28.)$$

Teraz chceme definovať tie meracie frekvencie, pri ktorých sa prejaví chyba ako pri kapacitných sondách chyba 41%, 12% a 5% . V tomto prípade ale nemôžeme jednoducho predpokladať, že $\alpha_{io} = \alpha_V$, pretože vplyvom rovnakej fázovej situácie mechanizmov strát sa objaví 50% chyba. Pre kremikový piesok ($\epsilon_K = 4,5$, $\delta_K = 2,6 \text{ g/cm}^3$), ktorého veľkosť zrna môžeme nateraz zanedbať, pri $F = 0,2$ v prvom kroku dostaneme:

$$\alpha_{io} = 23,4 \cdot \frac{1}{p_V} \quad (29.)$$

a v druhom kroku spoločne s obr. 8 a nasledujúcou minimálnou frekvenciou (obr. 9) pre dodržanie zodpovedajúcej chyby.

Obr. 9:

F	41%	12%	5%	t = 18°C
$p_V = 0,2 \text{ } \Omega\text{m}$	5 GHz	10 GHz	20 GHz	morská voda
$p_V = 16 \text{ } \Omega\text{m}$	500 MHz	1 GHz	1,8 GHz	tvrdá sieťová voda
$p_V = 80 \text{ } \Omega\text{m}$	200 MHz	500 MHz	800 MHz	mäkká sieťová voda
$p_V = 350 \text{ } \Omega\text{m}$	100 kHz	250 kHz	400 MHz	dažďová voda
$p_V = 10^5 \text{ } \Omega\text{m}$	< 100 MHz	< 100 MHz	< 100 MHz	destilovaná voda

Výsledky tohto predpokladu sú biedne. Kto dúfal, že použitím mikrovlnných sond zabráni vplyvom a skresleniam iónovej vodivosti, bude veľmi sklamaný. Pokiaľ pri kapacitných sondách máme chybu merania mäkkej sieťovej vody 5% pri cca 7,5 MHz, musí byť pri mikrovlnnom meraní zvolená frekvencia viac ako 800 MHz! Na dosiahnutie vysokej presnosti pri relatívne nízkych frekvenciách (2 .. 3 GHz) sa musia pred výpočtom utlmiť dodatkové meracie parametre (napr. fáza). Nemožno nespomenúť, že ostatné meracie parametre vykazujú s teplotou zvyšujúce sa tendencie, ktorú sú od parametra k parametru extrémne rozdielne a okrem toho sú vo vysokej miere závislé od frekvencie (multidimenzionálne krivky). Pri mikrovlnných sondách musíme preto merať strednú hodnotu meraného média. To nie je jednoduché, lebo v protiklade ku kapacitným sondám, mikrovlnný prijímač nemá veľký tepelný kontakt s meraným médiom a okrem toho prenos mikrovln cez médium môže byť niekoľko

metrov. Elektronická kompenzácia teploty je veľmi komplikovaná a bez podpory mikroprocesoru sa dá robiť len pre pevnú frekvenciu.

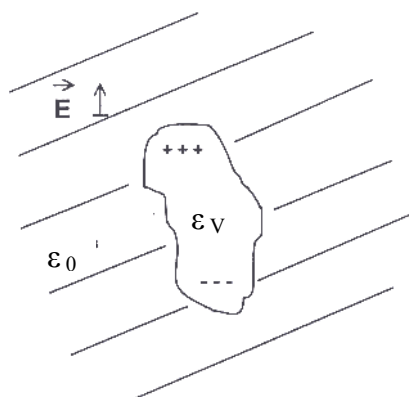
Pri kapacitných sondách vlhkosti neexistuje prakticky žiadna závislosť frekvencie tepelného priebehu od ε_v a na kompenzáciu najčastejšie stačí NTC rezistor, ktorý sa nachádza v sonde.

Vďaka tomu, že hĺbka vniknutia je v rozsahu niekoľkých decimetrov, nie je žiadny výraznejší problém so získaním strednej hodnoty média.

Vplyv od veľkosti zŕn.

Pri odvodzovaní telegrafnej rovnice sa zvyčajne predpokladá (divergencia) $\text{div } E = 0$, to zn. že v médiu sa nesmú nahromadiť náboje. V zrnitom médiu (sypký materiál) ale nastáva práve tento prípad. Obr. 10 ukazuje, čo sa stane, keď sa v homogénnom médiu, cez ktoré prechádza elektromagnetická vlna, nachádza predmet s inou dielektrickou konštantou ako má okolie.

Obr. 10:



(Rozloha inhomogenity musí byť omnoho menšia ako vlnová dĺžka v médiu.) Predmetom v homogénnom médiu môže byť kvapka vody alebo nejaká iná inhomogenita. Magnetická vlna, ktorá prechádza týmto médiom, vnútri periodickú polarizáciu dielektrika a predmet sa správa ako plávajúci dipól resp. srdcový oscilátor!

Tento plávajúci dipól vyžaruje elektromagnetickú vlnu, ktorá je známa ako rozptylová vlna (Rayleigh - rozptyl).

Pretože sa rozptylová vlna šíri vo všetkých smeroch, výsledný je temer guľový tvar. Energia rozptylovej vlny je absorbovaná z pôvodnej vlny, takže máme dočinenia s ďalším absorpčným mechanizmom, ktorý sa podobne ako iónová vodivosť, prekrýva s dielektrickými stratami a je rovnako nanajvýš nežiadúci.

Pretože presný prepočet tejto situácie je veľmi zložitý (rozhodujúci je aj tvar predmetu), urobíme opäť odhad:

Účinnosť (pomer vyžarovacieho a impulzného výkonu), ktorou plávajúci dipól s dĺžkou antény „h“ vyžaruje elektromagnetickú vlnu o dĺžke λ je:

$$\eta = \frac{8 \cdot h^3}{\lambda^3} \quad \left(h \leq \frac{\lambda}{2} \right) \quad (30.)$$

η dosahuje pri $h = \lambda/2$ maximum o hodnote 100%. Pre sypký materiál (kremíkový piesok) o vlhkosti $F = 0,2$, dostaneme rovnicu 5.: $\varepsilon_M = 30,3$. Rýchlosť svetla v tomto médiu má hodnotu, ktorá je menšia o koeficient $(\varepsilon_M)^{1/2}$ ako je rýchlosť svetla vo vákuu. Pre meráciu frekvenciu 10 GHz dostaneme dĺžku vlny $\lambda = 5,5$ mm. Pri strednej dĺžke inhomogenity $h = 1$ mm dostaneme z rovnice 30. hodnotu pre $\eta = 4,9\%$. Pre frekvenciu $f = 3$ GHz dostaneme $\eta = 0,1\%$.

Pre väčšie inhomogenity η extrémne narastá, takže pre $h = 2$ mm dostaneme:

pre $f = 10 \text{ GHz}$ $\eta = 39,5\%$

pre $f = 3 \text{ GHz}$ $\eta = 1,1\%$

Pri kapacitných sondách a meracej frekvencii 30 MHz sú rozptylové efekty zanedbateľné, pretože $\eta < 1 \cdot 10^{-6} \%$!

Výsledky tohto odhadu sa obdivuhodne zhodujú so skúsenosťami v praktickom využití, podľa čoho pre nasadenie pri väčších zrnách a súčasne pri veľkých vlhkostiach uprednostňuje v S - pásme ($\approx 3 \text{ GHz}$) pred meracou frekvenciou v pásme x ($\approx 10 \text{ GHz}$).

Podľa rovnice 30.) vlnová dĺžka môže spôsobiť 3. potenciál o nepatrnej frekvencii oproti meracej frekvencii, ale môže mať drastické dôsledky. Problémom mikrovlnných sond nie je len vo výške rozptylových strát, ale mnohonásobne viac v prídavných, výrazných závislostiach od tvaru zrnitých častíc a od samotnej vlhkosti. Zvlášť pozoruhodný prípad publikoval Menke, Vogt a Knöchel v ich publikácii "Mikrowellen – Streumessung" (mikrovlnné rozptylové meranie), kde boli skúmané rozdielne absorpcie repky a ovsa.:

Exaktná teória rozptylu hovorí, že zrná repky z dôvodu svojej oblej stavby sa rozptyľujú veľmi málo, naproti tomu zrná ovsa z dôvodu ich podlhovastého tvaru vyžarujú omnoho silnejšie. Autori mnohými meraniami podložili, že pri meracej frekvencii 10 GHz je absorpcia 4 cm hrubej vrstvy suchého ovsa je o 20% väčšia ako pri rovnakej vrstve suchej repky. Rozdielne správanie absorpcie a vyžarovania je do takej miery priťažujúca, že ani pri známej (!) vlhkosti by sa nadala merať ich zmes!

Zhrnieme to do jedného bodu: je nemožné merať vlhkosť sypkých materiálov mikrovlnnými sondami, ktoré sú zmesou materiálov s premenlivou skladbou, veľkosťou zŕn alebo inhomogenitou materiálu!

Zhrnutie:

Vzhľadom na problémy mikrovln s rozdielnymi tvarmi a veľkosťami zŕn sypkých materiálov je otázne, prečo sa tu pri týchto skúsenostiach tieto systémy predsa len používajú. Myslím, že veľa užívateľov tejto technológie nemá vedomosti o tom, aký veľký vplyv na presnosť meranie má zrnitosť média.

Mikrovlnný snímač môže byť **v niektorých prípadoch** lepší ako jednoduché nekompenzované kapacitné meranie, keď sú veľmi malé rozmery zŕn, vysoká homogenita zmesi a vysoká iónová konduktivita a kedy sa meracia frekvencia posunie kvôli zvýšeniu presnosti do pásma x. Ale mikrovlnné sondy majú svoje hranice, čarovať nedokážu!

K rozhodnutiu pre mikrovlnnú sondu môže dôjsť aj vtedy, ak sa požaduje meranie do veľkej hĺbky materiálu. (Meranie do veľkej hĺbky materiálu môže byť aj nevýhodou, keď sa meria na dopravníkovom pásu s variabilnou výškou média, kedy je nevyhnutné dodatočne merať výšku materiálu.)

K problémom dochádza akonáhle máme sypký materiál, ktorý má rôzne zloženie častíc (veľkosť, tvar), kedy dochádza k zanedbateľným rozptylovým efektom. Musí sa skúšať čo najnižšia frekvencia (napr. v pásme S), pri ktorej ešte nedochádza k problémom s iónovou vodivosťou. Súčasne sa musí optimalizovať vyžarovací výkon ako aj rozstup medzi vysielačom a prijímačom, čo nie je vzhľadom na osobitosti exponenciálneho absorpčného zákona k existujúcim možnostiam inštalácie triviálne.

Je potrebné mať na pamäti, že mikrovlnné meranie je technicky a fyzikálne veľmi komplikovaná meracia metóda, ktorej výsledky ovplyvňujú mnohé parametre a ich tepelné priebehy. Presné nastavenie pre určitý sypký materiál si vyžaduje poznatky skúseného špecialistu na mikrovlnnú technológiu, a preto je časovo a finančne náročné.

Pri kapacitných sondách je situácia jednoduchšia a menej komplikovaná. Najskôr sa vyskúša, či je geometria elektród, prípadne meracia frekvencia vhodná pre danú veľkosť zŕn, prípadne pre iónovú vodivosť, či je zvolená meracia sonda pre daný sypký materiál vôbec vhodná. Potom sa sonda nakalibruje dvomi kalibračnými vzorkami a nakoniec sa nainštaluje na miesto, kde sa očakáva tok reprezentatívneho sypkého materiálu. Vďaka meracej hĺbke je kalibrácia jednoduchá. Zariadenie (silo, atď.) sa nemusí viackrát zaplniť referenčným sypkým materiálom, ktorého vlhkosť bola vopred stanovená v laboratóriu. Stačí pripraviť iba malé množstvo kalibračnej vzorky v prenosnej nádobke (napr. vedro). Aj toto je **v praktickom využití enormná výhoda** (úspora času a nákladov).

Myslím si, vzhľadom na prehľadnosť meracieho princípu, jeho vysokej presnosti merania a mimoriadne jednoduchej obsluhy, ktorú si väčšina zákazníkov váži, že kapacitné meracie sondy vlhkosti sa na trhoch presadia.