



SLEDOVÁNÍ HYDRATACE BETONU V ODLIŠNÉM PROSTŘEDÍ METODOU IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE

Miroslav Luňák*, Ivo Kusák*, Luboš Pazdera*, Vlastimil Bílek**

*Ústav fyziky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně
**Železniční a průmyslový stavební výzkum

Abstrakt: Sledování procesu hydratace betonu v odlišných okolních podmínkách metodou impedanční spektroskopie jsou známa. Méně často jsou prováděna sledování zrání betonu uvedenou metodou, kdy měrný odpor směsi přesahuje hodnoty 500 kΩ. Na základě Debyeovy teorie [6, 7] vznikly modely dielektrika, jejich aplikací a obdrženími parametry dielektrika je charakterizován měřený materiál a diskutována jednoznačnost určení hodnot parametrů.

Úvod

Analýza impedančních spekter nehomogenních materiálů ve stavebnictví je doposud nerozvinutá část metody impedanční spektroskopie. Není zřejmá míra příspěvků jednotlivých složek materiálu k celkové vodivosti a polarizaci při různých frekvencích budícího elektrického pole. Materiál o vyšších hodnotách měrného odporu (>500kΩ) lze pojímat při vhodném zjednodušení jako dielektrikum. Pro homogenní materiály vybudoval teorii polarizace dielektrika Debye [6, 7]. Experimenty a závěry na reálných látkách však vykazovaly odlišnosti od základních teorií. K. S. Cole a R. H. Cole, dále Fuoss a Kirkwood odvodili z Debyeovy teorie modely dielektrika, více se blížíci experimentálním závěrům [6]. Chování dielektrika ve střídavém elektrickém poli je vhodné popisovat pomocí komplexní relativní permitivity. Debye odvodil pro slabě polární kapalná dielektrika vztah pro komplexní relativní permitivitu, ozn. ε^* :

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

Kde τ je relaxační doba, nezávislá na čase, závislá na teplotě, ε_s – statická permitivita (frekvence $\rightarrow 0$ Hz), ε_∞ – optická permitivita (frekvence $\rightarrow \infty$ Hz), úhlová frekvence $\omega=2\pi f$, f – frekvence budícího elektrického signálu [6, 7]

Pro ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ platí:

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

V reálném dielektriku se vyskytuje více relaxačních dob. Jejich rozdělení je dáno distribuční funkcí. Pro obtížnost určení vhodné distribuční funkce se zavádí aproximace

zvolenou analytickou funkcí. Podle Coleových vyjádříme komplexní relativní permitivitu následovně:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha}} \quad (3)$$

Kde τ_1 je nejpravděpodobnější relaxační doba, kolem níž jsou relaxační doby rozloženy podle distribuční funkce $f(\tau)$, α je distribuční parametr ($0 < \alpha < 1$).

J. R. Macdonald [7] nastínil ekvivalenci mezi tvarem výrazů pro komplexní relativní permitivitu ve smyslu (1), (3) a rovnic pro komplexní impedanci Z . Matematicky byly odvozeny vztahy pro reálnou a imaginární složku komplexní relativní permitivity a podle zmíněné ekvivalence vyjádřeny vztahy pro komplexní složky měrné impedance. Za použití matematického softwaru byly hledány hodnoty parametrů těchto dvou typů modelů pro testovaný materiál. Míru lineární závislosti modelové a experimentální závislosti vyjadřuje Pearsonův korelační koeficient r .

Popis měřeného materiálu

Vzorky betonu 100 mm x 100 mm x 400 mm byly pro měření impedanční spektroskopii rozděleny na tloušťku 10 mm tj. 100 mm x 100 mm x 10 mm. Složení vzorků je uvedeno v tab. 1:

| C 30/37 XF4, S4, plocha NH | |
|----------------------------|------------------|
| | 1 m ³ |
| CEM I 42,5R | 320 |
| Struska 420 | 100 |
| Voda | 210 |
| Spolostan 7L | 4 |
| Chrysoair | 0,15 |
| Halámky D5 0/4 | 800 |
| Rejta 4/8 | 280 |
| Rejta 8/16 | 500 |

Tabulka 1. Složení použitých vzorků betonu (množství v kilogramech).

Na stěny vzorků byly přiloženy mosazné kontaktní elektrody o rozměru 40 x 23 mm.

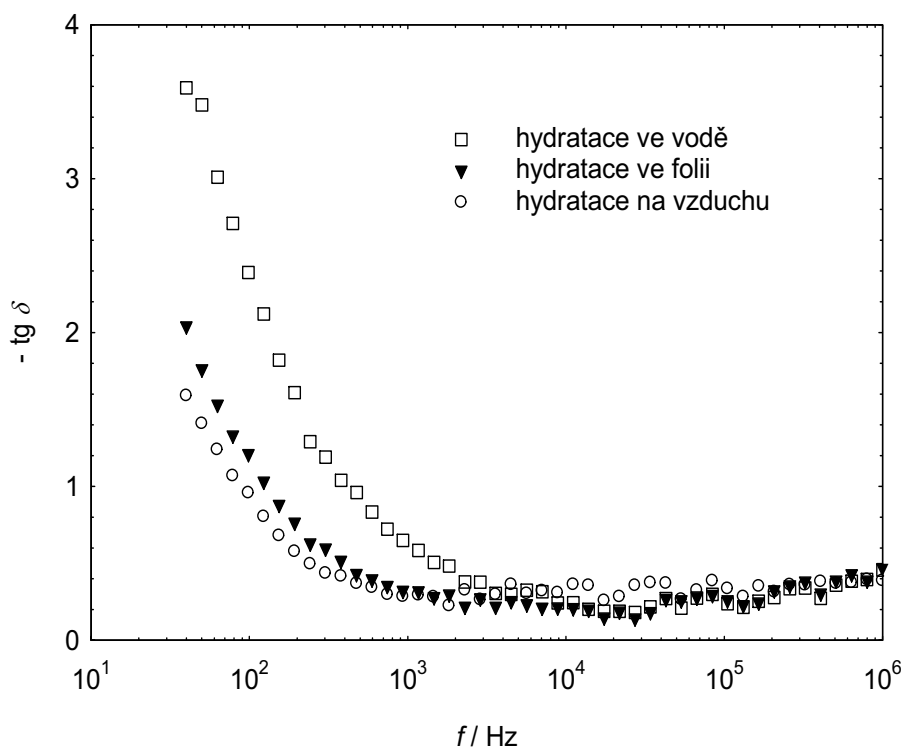
Experiment

Metodou impedanční spektroskopie a s použitím generátoru sinusového signálu Agilent 33220A a osciloskopu Agilent 54645A byly charakterizovány vzorky betonu po 15 dnech zrání. Zrání každého vzorku proběhlo v odlišném prostředí. Pomocí softwaru pro obsluhu uvedených přístrojů a zpracování dat byla získána spektra ztrátového činitele v závislosti na frekvenci, závislosti imaginární složky měrné impedance na reálné složce měrné impedance. Hodnoty složek měrné impedance každého vzorku byly vypočteny z experimentálně zjištěných hodnot reálné a imaginární složky impedance, podělením dané složky impedance tloušťkou vzorku a vynásobením plochou elektrod.

Z modelů byly určeny hodnoty koeficientů, uvedených v tabulce 2 a diskutovaných dále.

Výsledky měření a modelové parametry

Obrázek 1 znázorňuje experimentální spektra ztrátového činitele pro uvedenou škálu frekvencí. Nejvyšších hodnot nabývá ztrátový činitel při nejnižších aplikovaných frekvencích elektrického pole budícího signálu.

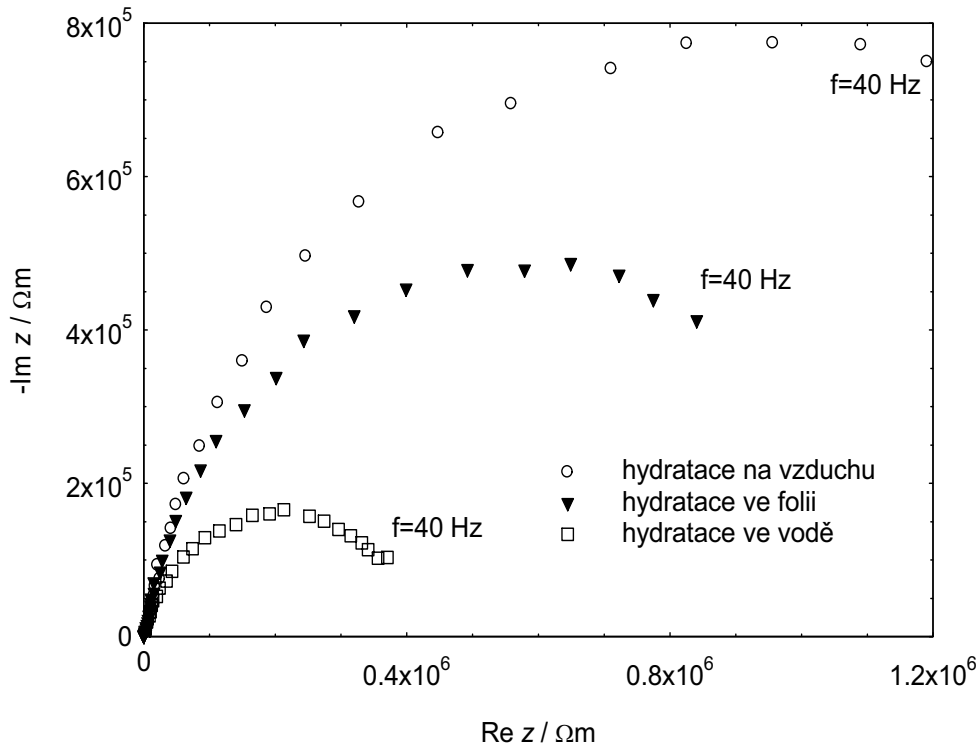


Obrázek 1. Frekvenční spektra ztrátového činitele betonu, hydratujícího v odlišných prostředích.

Hodnoty ztrátového činitele betonu ve sledovaném čase pro vzorky hydratované ve vodě zůstávají vyšší než u vzorků hydratovaných ve folii a na vzduchu až po frekvenci přibližně 4 kHz, kdy spektra nabývají navzájem blízkých hodnot. Vyšší hodnoty ztrátového činitele v levé části spektra indikují vyšší četnost relaxačních dob než v pravé části spektra, maximum by pak určovalo nejpravděpodobnější relaxační dobu pro daný vzorek v aktuálním stavu (složení, míra hydratace, vlhkost). Z odlišnosti spekter usuzujeme na vyšší hodnotu nejpravděpodobnější relaxační doby u vzorku, hydratujícím na vzduchu. Nejblíže k nejpravděpodobnější relaxační době uvedeného vzorku se nachází nejpravděpodobnější relaxační doba pro vzorek zrající ve folii, s rozložením relaxačních dob, podobným vzorku hydratujícím na vzduchu. Od frekvence 4 kHz vykazují všechny průběhy ztrátového činitele kolísání hodnot, je však přítomný trend. U vzorku, který hydratoval na vzduchu jsou patrné v intervalu frekvencí 9 kHz až 100 kHz odlišné hodnoty ztrátového činitele, než u zbylých vzorků. Všechna spektra vykazují v oblasti vyšších frekvencí mírný nárůst hodnot ztrátového

činitele. Vysvětlení lze hledat v přítomnosti vody v kamenivu nebo druhu použitého kameniva (kámen Halámky - frakce 0/4 – druh žuly). Druhý argument více koresponduje se závěry charakterizace druhů žuly v suchém a navlhčeném stavu metodou impedanční spektroskopie [8]. Na konci článku bude srovnání uvedených rozborů spektra se závěry na základě modelů.

Změřená spektra hodnot měrné impedance pro sledovaný materiál jsou v souladu s teorií (Coleovi, Macdonald) půlkružnice [6, 7], jejichž střed je stlačen pod vodorovnou osu. Obrázek 2.



Obrázek 2. Hodnoty měrné impedance použitých vzorků v době charakterizace metodou impedanční spektroskopie.

Nejnižší hodnoty měrné impedance v celém spektru hodnot frekvence budícího elektrického signálu (nárůst frekvence zprava doleva, obrázek 2) byly pozorovány u vzorku, zrajícím ve vodě. Vzorek byl v době experimentu vodivější, ale imaginární složka měrné impedance nabývala v poměru k reálné složce vyšších hodnot, než u ostatních vzorků. To koresponduje s popsányými závislostmi ztrátového činitele. Křivky ve spektru měrné impedance nabývají maxima při odlišných frekvencích. Křivka vzorku, který hydratoval na vzduchu, má maximum už při frekvencích 50 Hz - 60 Hz, křivka uprostřed dosahuje maxima při 80 Hz - 120 Hz, poslední křivka má maximum kolem frekvence 250 Hz .

Uvedená spektra byla modelována fyzikálním a matematickým modelem. Výsledky fitování shrnuje následující tabulka.

Tabulka 2. Hodnoty parametrů modelů spekter ztrátového činitele a měrné impedance vzorků betonu, hydratujících v různých prostředích.

| č.ř. | aproximované spektrum | parametr | prostředí hydratace | | | jednotka | pozn. |
|------|-----------------------|----------|---------------------|----------------|--------------|----------|-------|
| | | | voda | folie | vzduch | | |
| | | | 1 | tg $\delta(f)$ | ϵ_n | | |
| 2 | ϵ_s | 5,30E+05 | 3,60E+04 | | 1,30E+04 | - | |
| 3 | τ | 6,4 | 0,964 | | 0,473 | s | |
| 4 | α | 0,114 | 0,176 | | 0,268 | - | |
| 5 | r | 0,9924 | 0,9621 | | 0,8837 | - | |
| 6 | počet bodů | N | 46 | 46 | 46 | - | |

Ze spektra ztrátového činitele byly získány hodnoty komplexní relativní permitivity ϵ^* pro limitní případy frekvence budícího signálu, nejpravděpodobnější doba relaxace τ a distribuční parametr α . Hodnoty dynamické permitivity pro hydrataci v různých prostředích mají vzestupnou tendenci, naopak hodnoty statické permitivity mají klesající charakter. Nejpravděpodobnější doba relaxace potvrzuje odhady z diskuse spekter ztrátového činitele. Hodnoty distribučního parametru α jsou vyšší s klesajícím obsahem vody v prostředí hydratace betonu. Korelační koeficient byl nejnižší pro fitování spektra ztrátového činitele betonu, zrajícího na vzduchu.

Závěr

Metodou impedanční spektroskopie byl charakterizován beton, hydratující v různých prostředích. Odlišnosti ve spektrech ztrátového činitele svědčili o nejpravděpodobnějších relaxačních dobách, umístěných mimo využití spektrum frekvencí. Model spektra to potvrdil a určil tyto hodnoty. Obtížným a méně přesným označujeme fitování spektra ztrátového činitele pro beton tuhnoucí na vzduchu, na základě nízké hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu.

Poděkování

Tento výzkum byl proveden za podpory projektů GAČR 103/06/1711, GAČR 103/06/0708 a MSM 0021630519.

Literatura

- [1] Schauer, P.: *Impedanční spektroskopie keramiky a žuly*, sborník XI. Mezinárodní vědecké konference (str. 77-82), 18.-20. října 1999-VUT Brno, FAST
- [2] Schauer, P.: *Model impedanční spektroskopie*, sborník XI. Mezinárodní vědecké konference (str. 73-76), 18.-20. října 1999-VUT Brno, FAST
- [3] Kusák, I., Luňák, M., Schauer P.: *Aparatura pro testování metodou impedanční spektroskopie*, in: Workshop NDT 2004, Non-Destructive Testing, 1.12.2004, ed. by Brno University of Technology, 2004, 99-101, ISBN 80-7204-371-4
- [4] Luňák, M., Kusák, I., Schauer P.: *Metoda Impedanční spektroskopie*, in: Workshop NDT 2004, Non-Destructive Testing, 1.12.2004, ed. by Brno University of Technology, 2004, 106-108, ISBN 80-7204-371-4

- [5] Kusák, I., Luňák, M., Schauer P.: *Závislost impedančního spektra cementotřískové desky cetris-basic na vlhkosti*, in: Workshop NDT 2005, Non-Destructive Testing, 30.11.2005, ed. by Brno University of Technology, 78-81, ISBN 80-7204-420-6
- [6] Mentlík, V: *Dielektrické prvky a systémy*, BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-189-6
- [7] Macdonald, J., R.: *Impedance spectroscopy, emphasizing solid materials and systems*, bibliography, Canada 1987
- [8] Kusák, I., Luňák, M., Schauer P.: *Impedanční spektroskopie žuly*, in: Workshop NDT 2004 Non-Destructive Testing, 1.12.2004, ed. by Brno University of Technology, 2004, 102-105, ISBN 80-7204-371-4