



## SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ MODELU IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE NA ZÁKLADĚ DEBYEOVY TEORIE PŘI HYDRATACI BETONU

Miroslav Luňák, Ivo Kusák, Luboš Pazdera, Vlastimil Bílek

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

**Abstrakt:** Impedanční spektroskopie poskytuje obraz o elektrických a dielektrických vlastnostech materiálu. Ve stavebnictví jsou často používány mikroskopicky nehomogenní materiály. Impedanční spektra betonu se odlišují od ideálních spekter elektrotechnických prvků. Na základě Debyeovy teorie existují odvozené modely dielektrika, aplikovatelné na reálné materiály. Určení hodnot parametrů tohoto modelu není jednoduché a jednoznačné. Příspěvek uvádí hodnoty parametrů modelu pro průběh hydratace betonu v čase. Je nastíněna možná souvislost vybraných parametrů s pórovitostí betonu.

### Úvod

Impedanční spektroskopie je výkonná metoda pro charakterizaci elektrických vlastností rozličných materiálů. Omezením v jejím použití je aplikace elektrodového systému na testovaný vzorek z tuhé látky, definované tloušťky, v podobě mosazná elektroda – měřený materiál – mosazná elektroda. Metoda není zatím aplikovatelná na tlustovrstvé materiály a materiály s nízkou vodivostí (ve stavebnictví např. stavební dílce, mostní konstrukce, apod.).

Mezi standardní postupy při použití metody impedanční spektroskopie dnes patří interpretace výsledků modelů, aplikovaných na experimentální data. Zpravidla na základě Debyeovy teorie jsou vytvářeny modely dielektrika, zahrnující modelové závislosti komplexní relativní permitivity, kterými jsou fitovány pomocí matematického software experimentální křivky složek komplexní relativní permitivity a analogicky například spektra měrné impedance materiálu, které však v tomto článku nebude věnována pozornost.

Základní model Debyeovy teorie dielektrika je popsán rovnicí 1, kde  $\varepsilon^*$  je komplexní permitivita,  $\varepsilon_n$  – dynamická permitivita,  $\varepsilon_s$  – statická permitivita,  $\tau$  – nejpravděpodobnější relaxační doba,  $\alpha$  – distribuční parametr,  $\omega$  – úhlová frekvence.

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

## Měřené materiály

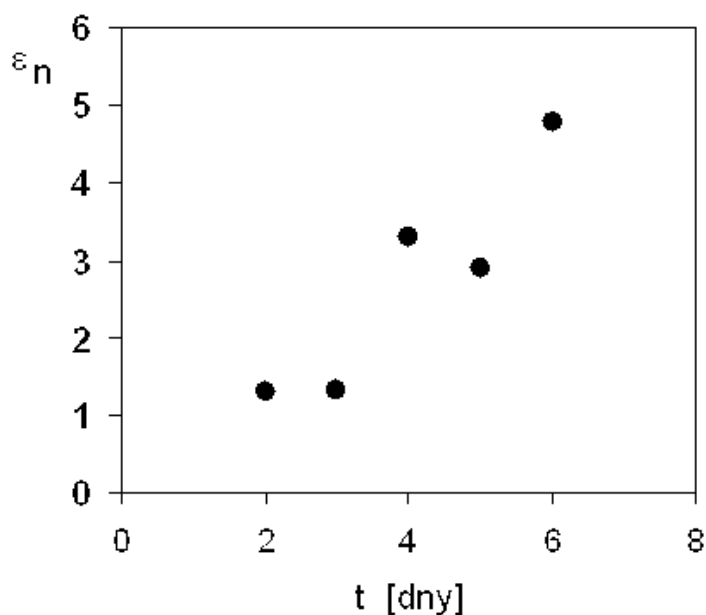
Vzorky betonu o rozměrech 100 mm x 100 mm x 400 mm byly pro měření impedanční spektroskopii rozděleny na dílce o tloušťce 10 mm tj. 100 mm x 100 mm x 10 mm.

Vzorky betonu byly charakterizovány v průběhu hydratace po dobu 5 dnů. Složení vzorků je uvedeno v tabulce 1:

C 30/37 XF4, S4, plocha NH		
	Hmotnost (kg) v 1 m <sup>3</sup>	Hmotnost (kg) v 17 l
CEM I 42,5R	320	5,45
Struska 420	100	1,7
Voda	210	3,57
Spolostan 7L	4	0,8
Chrysoair	0,15	2,5
Halámky D5 0/4	800	13,6
Rejta 4/8	280	4,76
Rejta 8/16	500	8,5

Tabulka 1. Hmotnostní zastoupení složek betonu pro použité vzorky

## Výsledky modelování

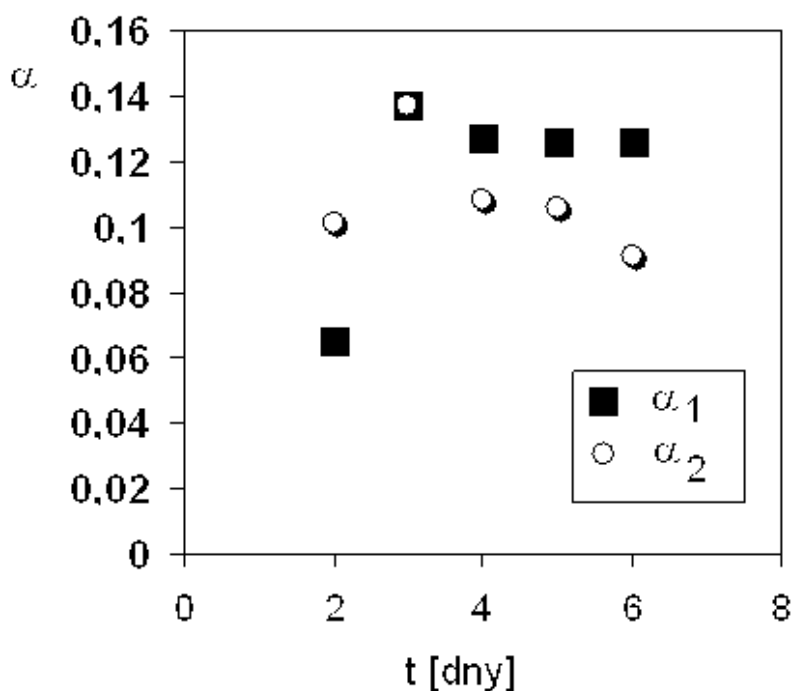


Obrázek 1. Hodnoty dynamické permitivity betonových vzorků v průběhu hydratace

Na obrázku 1 jsou vyznačeny hodnoty optické (dynamické) permitivity měřeného materiálu v průběhu hydratace betonu. Pozorujeme narůstání hodnoty  $\varepsilon_n$ , nelze však rozhodnout, zda je narůstání lineární nebo exponenciální. Hodnoty uvedené permitivity odpovídají hodnotám zjištěným orientačním měřením kapacity elektrodového systému bez vzorku a se vzorkem. Blížkost hodnot dynamické permitivity v druhém a třetím dnu nasvědčuje asymptotickému přibližování k hodnotě blízké 1 pro dobu jdoucí k počátku hydratace.

Na Obrázku 2 vidíme hodnoty distribučního parametru  $\alpha$  v průběhu hydratace. Spektrum  $\alpha_1$  bylo získáno z proložení hodnot závislosti ztrátového činitele na frekvenci, druhé spektrum -  $\alpha_2$  - určeno ze spektra imaginární složky měrné impedance v závislosti na reálné složce měrné impedance. V prvním dnu hydratace byla určena vyšší hodnota pro první spektrum, ve třetím dnu hydratace byly určeny identické hodnoty distribučního parametru. Následující dny byly hodnoty distribučního parametru vyšší pro spektrum  $\alpha_1$  než pro spektrum  $\alpha_2$ . Narůstající tendence v prvních dnech hydratace a klesající charakter spekter pro další dny hydratace od třetího dne jsou společné pro obě spektra.

Koeficient stlačení svědčí o míře rozptylu relaxačních dob kolem nejpravděpodobnější relaxační doby v celém frekvenčním spektru a nepřímo úměrně indikuje míru polarizačních mechanismů v materiálu v průběhu hydratace.



**Obrázek 2.** Hodnoty distribučního parametru v průběhu hydratace.  $\alpha_1$  – získáno ze spektra ztrátového činitele v závislosti na frekvenci,  $\alpha_2$  – určeno ze spektra imaginární složky měrné impedance v závislosti na reálné složce měrné impedance.

## Závěr

Všechny hodnoty parametrů, prezentované v uvedených grafech (Obrázek 1 a 2), byly získány ze spektra ztrátového činitele v závislosti na frekvenci a ze spektra imaginární složky měrné impedance v závislosti na reálné složce měrné impedance. Přesnost hodnot parametrů závisí na množství experimentálních dat, ale také na zkušenostech autora.

Ve zjištěných spektrech byl pozorován trend. Nevýhodou byla volba velkých časových odstupů mezi měřeními.

## Poděkování

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

## Literatura

- [1] 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
- [2] 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
- [3] Mentlík, V: *Dielektrické prvky a systémy*, BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-189-6
- [4] Macdonald, J., R.: *Impedance spectroscopy, emphasizing solid materials and systems*, bibliography, Canada 1987
- [5] 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