

SLEDOVÁNÍ HYDRATACE BETONU IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIÍ

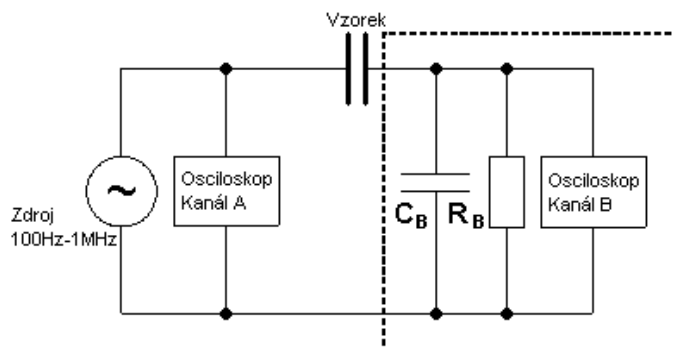
Ivo Kusák, Miroslav Luňák, Libor Topolář, Luboš Pazdera, Vlastimil Bílek

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

Abstrakt: Metodou impedanční spektroskopie ze skupiny metod Nedestruktivního testování byly charakterizovány vzorky betonu a sledovány změny ve spektru při jeho hydrataci. Byly pozorovány rozdíly ve spektru $\tan \delta(f)$ a $\text{Im } Z(f)$ resp. $\text{Re } Z(f)$ u vzorků a popsána kvalita pomocí druhu ztrát dominujících v materiálu. Z výsledků lze očekávat korelaci mezi n -faktorem metodou impedanční spektroskopie a dobou tuhnutí betonu.

Úvod

Impedanční spektroskopie je nedestruktivní testovací metoda, využívající frekvenční závislost impedančních charakteristik k analýze vlastností látky. Experimentální uspořádání měřené soustavy je: kov-měřený materiál-kov, které určuje omezení metody impedanční spektroskopie. Metodu nelze aplikovat u tlustovrstvých materiálů nízké vodivosti. Příkladem mohou být železobetonové výrobky. Podstatou zmiňované metody je sledování frekvenční závislosti dielektrických ztrát, které mohou nabývat několikanásobně vyšších hodnot u kompozitních materiálů a plastů, než u většiny materiálů používaných ve stavebnictví.



Obrázek 1. Detailní zapojení přístrojů (zdroj střídavého napětí, testovaný vzorek, dvoukanálový osciloskop) [3]

Frekvenční závislost veličin vyhodnocovaných při impedanční spektroskopii je zjišťována z poměru napětí (U_B/U_A) a fázového posuvu ($\Delta\varphi$) mezi signály A,B dvoukanálového osciloskopu.

Přesné hodnoty paralelní kombinace C_B a R_B jsou určeny vstupní kapacitou a vstupním odporem kanálu B (včetně přívodních vodičů s BNC konektory). Není tedy nutné předřazovat jinou přesnou paralelní kombinaci C a R před vstup B. Celkovou impedanci paralelní kombinace C_B a R_B označme Z_B a jí odpovídající fázi φ_B (ω -úhlová frekvence).

Fáze měřené impedance Z bude

$$\varphi_I = \varphi_B + \arctan \frac{\sin \Delta\varphi}{\frac{U_B}{U_A} - \cos \Delta\varphi}. \quad (1)$$

Měřená impedance Z bude mít velikost

$$Z = \frac{Z_B \cdot \sin \Delta\varphi}{\frac{U_B}{U_A} - \sin(\varphi_B - \varphi_I)}. \quad (2)$$

Ztrátový činitel testované soustavy

$$\tan \delta = \frac{I}{\tan \varphi_I}. \quad (3)$$

Odpor paralelního RC obvodu tvořeného měřenou soustavou (vzorkem)

$$R = \operatorname{Re}(Z) \cdot (1 + \tan^2 \varphi_I) \quad (4)$$

a jeho kapacita

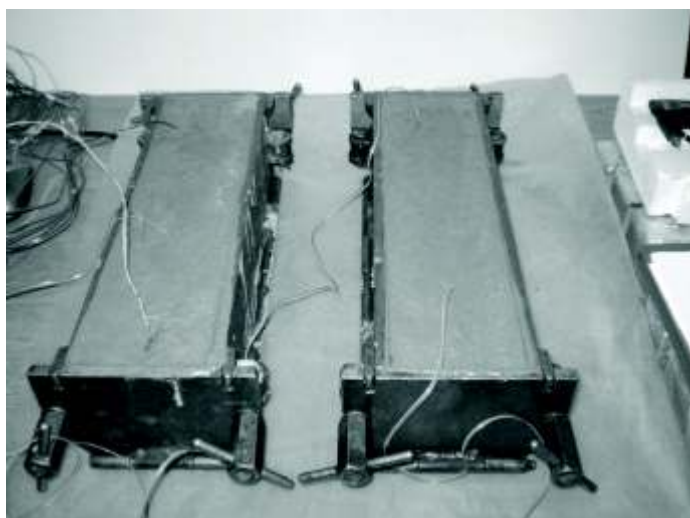
$$C = -\frac{\tan \varphi_I}{\omega R}. \quad (5)$$

Popis měřeného materiálu

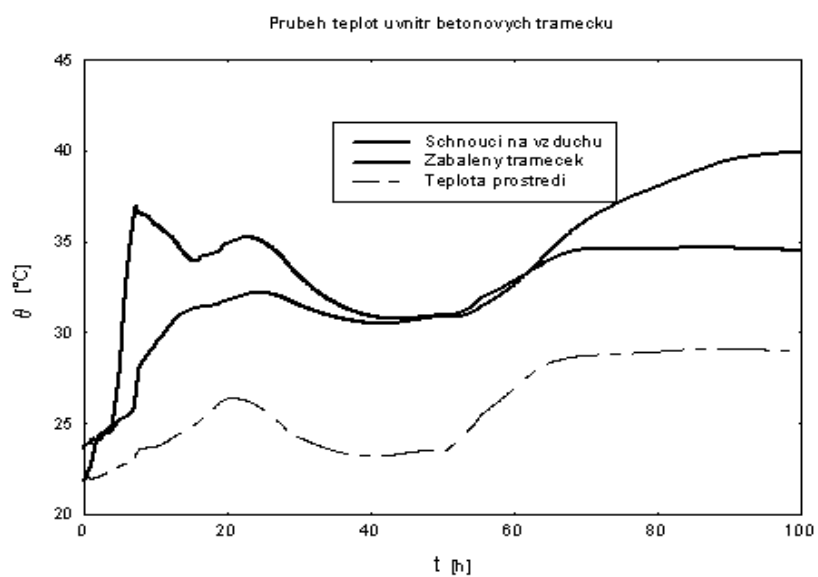
Vzorky betonu 100 mm x 100 mm x 400 mm byly pro měření impedanční spektroskopii rozděleny na tloušťku 10 mm tj. 100 mm x 100 mm x 10 mm. Složení vzorků je podle receptury viz. tab. 1:

C 30/37 XF4, S4, plocha NH			
	1 m ³	171	
CEM I 42,5R	320	5,45	19,5
Struska 420	100	1,7	20,75
Voda	210	3,57	
Spolostan 7L	4	68	
Chrysoair	0,15	2,5	
Halámky D5 0/4	800	13,6	13,6
Rejta 4/8	280	4,76	25,5
Rejta 8/16	500	8,5	34,0

Tabulka 1. Procentuální podíl materiálového složení betonu



Obrázek 2. Dva vzorky betonu při měření teploty, těsně po nalití do trámečků



Obrázek 3. Sledování průběhu teploty uvnitř betonových vzorků během tuhnutí

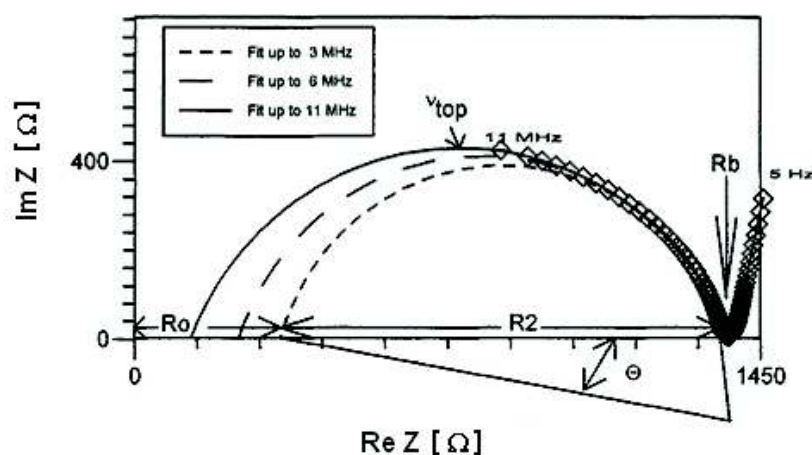
Experiment

Základem experimentu bylo rozlišení impedančního spektra samozhutnitelného betonu při tuhnutí. Vzorky byly postupně vkládány mezi 2 elektrody (přitlačeny pomocí šroubového mechanismu) a podrobeny impedanční analýze.

Výsledky měření

K pórovitosti resp. určení její míry se vztahuje závislost imaginární složky impedance $\text{Im}(Z)$ na reálné složce impedance $\text{Re}(Z)$. Z této závislosti určíme úhel, který svírá úsečka (spojnice počátku oblouku s obloukovým středem) s reálnou osou impedance (viz. obr. 4 - úhel proložené přímkou s reálnou osou). Podle uvedeného vzorce s dosazením daného úhlu (v radiánech) je možné vypočítat hodnotu n faktoru, který charakterizuje míru pórovitosti vzorku.

$$n = 1 - (2\theta / \pi).$$



Obrázek 4. Ilustrativní graf závislosti imaginární složky impedance $\text{Im}(Z)$ na reálné složce impedance $\text{Re}(Z)$

V následující tabulce (za použití Mathcadu) jsou vypočítané n -faktory pro různá stádia hydratace braná z reálné a imaginární části impedance:

Datum měření	Čas tuhnutí (dny)	n
30.3.	1	0,618
2.4.	3	0,899
3.4.	4	0,908
4.4.	5	0,930
5.4.	6	0,932
6.4.	7	0,933

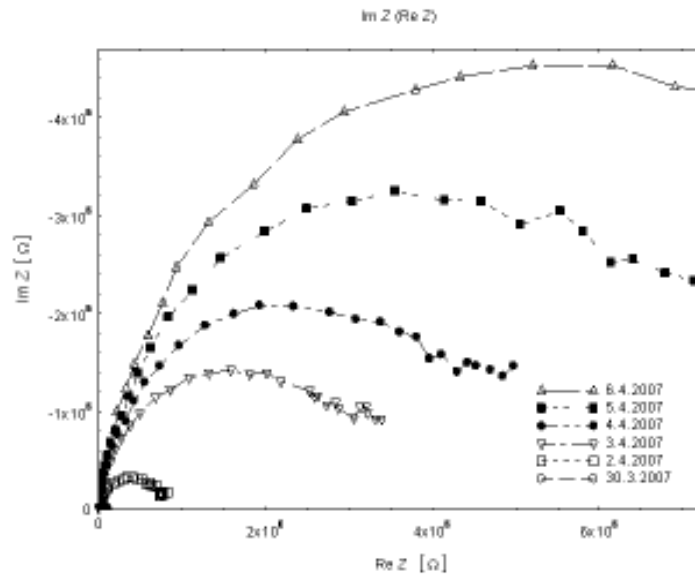
Tabulka 2. Výpočet n -faktoru v průběhu hydratace betonu vyrobeného 29.3.

Je jasně patrné, že n -faktor s dobou hydratace roste. Ke konci týdenního cyklu se již téměř nemění. Výchozími křivkami k výpočtu n -faktoru byly průběhy na obrázku 5.

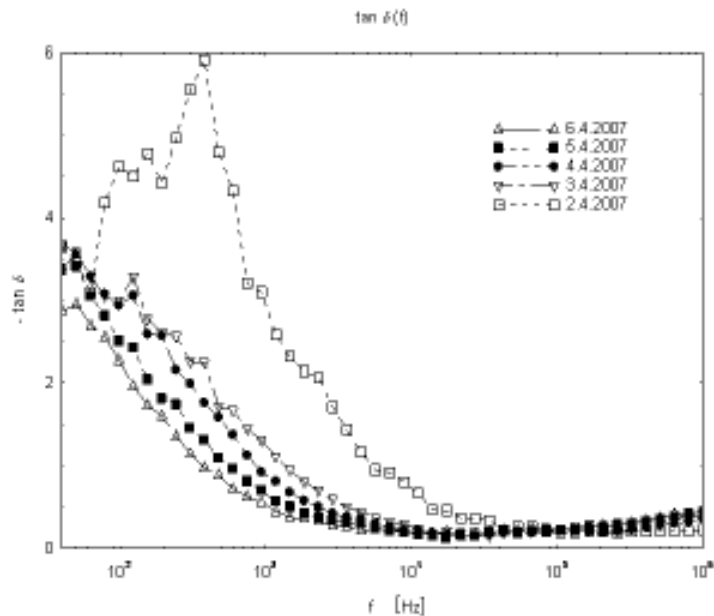
Nevýhodou sledování charakteristik na obrázku 5 je, že musí mít nadělené vzorky stejnou tloušťku. Z tohoto ohledu je výhodnější závislost ztrátového činitele ($\tan \delta$) na frekvenci (f) (osa frekvence grafu na obrázku 6 je pro lepší názornost zobrazena

v logaritmických souřadnicích). Ztrátový činitel jako parametr je čistě materiálová konstanta, která nesouvisí ani s geometrií, ani s rozměry vzorku [4].

Odstupňování hodnot na obrázku 5 odpovídá měření po jednom dni hydratace. Křivka zjištěná po prvním dni hydratace (30.3.2007) dosahuje v porovnání s ostatními o několik řádů nižších hodnot, proto je z grafu velmi špatně patrná.



Obrázek 5. Graf závislosti imaginární složky impedance $\text{Im}(Z)$ na reálné složce impedance $\text{Re}(Z)$



Obrázek 6. Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci u vzorku betonu (osa frekvence v log souřadnicích)

Z grafu na obrázku 6 je jasně patrná dominance vodivostních ztrát (klesající charakter ztrátového činitele $\tan \delta$) a to ve všech fázích hydratace betonu. Čím déle materiál hydratoval, tím menší hodnoty ztrátových činitelů byly zjištěny (téměř v celém frekvenčním spektru). Například pro frekvenci 1 kHz je rozdíl $\tan \delta$ po šestém a prvním dnu hydratace $\sim 2,5$. Materiál se tedy stával méně elektricky vodivým. Dalo by se předpokládat, že čím větší je materiál izolant (díky vzniklým kapilárním pórům), tím nižších ztrátových indexů je dosaženo k daným frekvencím, ale o hodnotě ztrátového činitele rozhoduje také permitivita materiálu. Z fázorového diagramu $\text{Im}Z(\text{Re}Z)$ vyplývá že s klesající reálnou složkou impedance klesá i imaginární složka impedance. To koresponduje s rostoucím ztrátovým činitelem. Dominance polarizačních ztrát (rostoucí charakter $\tan \delta$) se projevila jen po prvním dni hydratace a to do frekvence ~ 500 Hz. S rostoucí vlhkostí roste též ztrátový činitel materiálu. Obecně polarizační mechanismy charakterizují v materiále vlhkost, změnu pružnosti, vadu a jiné.

Závěr

Metodou impedanční spektroskopie byla provedena charakterizace betonu ve stádiu hydratace.

Změna frekvenčních charakteristik odpovídá předpokladům, že se změnou fyzikálních vlastností dochází ke změně impedančního ztrátového činitele. Byly popsány dielektrické ztráty. Charakteristiky v úzkých časových intervalech byly reprodukovatelné.

Poděkování

Tento výzkum byl proveden za podpory projektu GAČR 103/06/0708 a GA103/06/1711. Autoři článku děkují za tuto podporu.

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