



MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ U BETONOVÝCH PLÁTŮ RŮZNÉHO SLOŽENÍ MEASUREMENTS OF ELECTRIC PARAMETERS OF CONCRETE SLABS OF DIFFERENT COMPOSITION

Ivo KUSÁK*, Bohumil KOKTAVÝ*, Miroslav LUŇÁK*

*Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veveří 95, 60200 Brno, Czech Republic

Contact e-mail: kusak@dp.fce.vutbr.cz, koktavý.b@fce.vutbr.cz,
lunak@dp.fce.vutbr.cz

Abstrakt

NDT metodou impedanční spektroskopie [4] byly charakterizovány vzorky betonových plátů. Byly pozorovány rozdíly ve spektru $\tan\delta(f)$, $C(f)$ a $R(f)$ vzorků v suchém stavu. Dále byla popsána kvalita pomocí druhu ztrát dominujících v materiálu. Měřením byla ověřena reprodukovatelnost této metody a popsán vliv složení betonových vzorků na elektrické parametry.

Klíčová slova: impedanční spektroskopie, dielektrické ztráty, ztrátový činitel, vodivostní ztráty, polarizační ztráty

Abstract

NDT impedance spectroscopy method [4] was employed to characterize concrete slab specimens. Differences in $\tan\delta(f)$, $C(f)$ and $R(f)$ spectra for dry specimens were observed. Furthermore, based on the predominant loss type, the material quality was characterized. Our measurements confirmed the reproducibility of this method. Furthermore, the influence of the concrete specimen composition on their electric parameters was assessed.

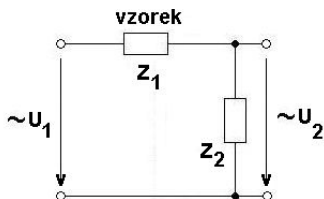
Key words: impedance spectroscopy, dielectric losses, loss factor, conductivity losses, polarization losses

1. Úvod

Představovaná měřící metoda impedanční spektroskopie vychází z měření elektrických impedančních charakteristik měřené soustavy, která má uspořádání **kov - stavební látka - kov**. Stavební látka se v této soustavě chová jako **dielektrikum**. Zkoumáme tedy vlastnosti tohoto dielektrika. Indikátorem vlastností jsou frekvenční závislosti reálné a imaginární části impedance měřené soustavy a zejména frekvenční závislost **ztrátového činitele** látky. Pomocným indikátorem jsou frekvenční závislosti odporu a kapacity soustavy, do které byl stavební materiál zabudován.

Metoda je zaměřena na kvalitativní a kvantitativní vyhodnocení výše jmenovaných parametrů. Z charakteru křivek je možno detekovat **vliv vlhnutí a vysoušení** na zkoumaný materiál, **změnu jeho struktury, změnu pórovitosti, ztrátu životnosti,**

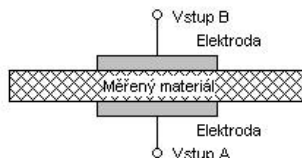
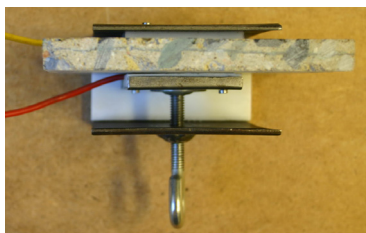
chyby v technologii výroby zkoumaného materiálu aj. Srovnáním výsledku s impedančním spektrem definovaného vzorku můžeme přesně poukázat na odchylky ve sledovaných vlastnostech. Vyčíslit stavební parametry materiálu však touto metodou nelze. Velmi dobře je však možné tuto metodu použít jako srovnávací, a po dalším rozpracování a analyzování myšlenky předpokládáme, že bude možné metodu použít i absolutně.



Obr. 1 Schéma zapojení měřené impedance Z_1 a impedance známé hodnotě Z_2 . U_1 , U_2 – elektrické napětí vstup, výstup

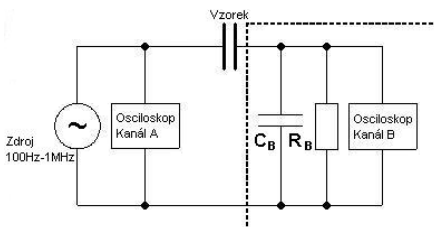
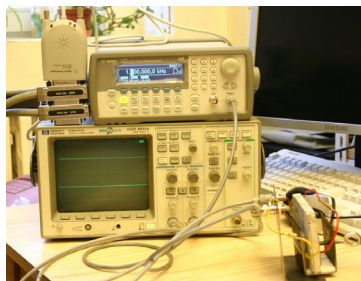
Fig. 1 Circuit diagram for the unknown impedance Z_1 to be measured and the known value impedance Z_2 .

Here, U_2 , U_1 = input, output electric voltages, respectively



Obr. 2 Systém kov-stavební látka-kov (mosazné elektrody jsou přitlačovány k povrchu měřených vzorků)

Fig. 2 Metal – building material – metal system (Brass electrodes are pressed against the measured specimen surface)



Obr. 3 Využití přístroje firmy Agilent a HP včetně schématu jejich zapojení

Fig. 3 Illustration and block diagram of the apparatus employing Agilent and HP measuring instruments

Frekvenční závislost veličin vyhodnocovaných při impedanční spektroskopii je zjišťována z poměru napětí (U_B/U_A) a fázového posuvu ($\Delta\varphi$) mezi vstupy 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

$$\varphi_1 = \varphi_B + \arctan \frac{\sin \Delta\varphi}{\frac{U_B}{U_A} - \cos \Delta\varphi}. \quad (1)$$

Měřená impedance Z bude mít velikost

$$Z = \frac{Z_B \cdot \sin \Delta\varphi}{\frac{U_B}{U_A} - \sin(\varphi_B - \varphi_1)}. \quad (2)$$

Ztrátový činitel testované soustavy

$$\tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi_1}. \quad (3)$$

Odpor paralelního RC obvodu tvořeného měřenou soustavou (vzorkem)

$$R = \operatorname{Re}(Z) \cdot (1 + \tan^2 \varphi_1) \quad (4)$$

a jeho kapacita

$$C = -\frac{\tan \varphi_1}{\omega R}. \quad (5)$$

2. Popis betonových plátů a jejich receptura

Pro výrobu zkušebních těles byly použity ocelové formy. Směsi byly plněny do forem vždy ve dvou vrstvách, doby hutnění jsou uvedeny u jednotlivých receptur. Naplněné formy byly uloženy v laboratoři s teplotou $20 \pm 1^\circ \text{C}$ a RV $45 \pm 5\%$. Po zavaznutí povrchu vyrobených těles byly formy překryty PE fólií. Tělesa byly doformována po 24 hodinách a následně byla uložena ve vodní lázni po dobu 28-mi dnů.

Rozměry těles byly 100x100x400 mm. Betonové pláty byly nařezány diamantovou pilou z výše uvedené normové kostky na tloušťku 10 mm. Rozměry těchto plátů tedy byly 100x100x10 mm. Podstatným parametrem je tloušťka z důvodu tlumení signálu. Referenční receptura byla navržena jako beton B20/25 s maximálním zrnem kameniva 4 mm.

R3E	množství	jednotka	R4B	množství	jednotka
	1 m ³			1 m ³	
cement CEM II 32,5 R	325	kg	cement CEM II 32,5 R	325	kg
písek 0-4 mm Bratčice	1885	kg	písek 0-4 mm Bratčice	1125	kg
-	-	-	drť 4-8 Tovačov	760	kg
skutečná voda	283,7	l	skutečná voda	223,8	l
vodní součinitel v/c	0,87	-	vodní součinitel v/c	0,69	-

- mícháno strojně, ručním míchadlem
- písek vysušený
- po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 113,7 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
- provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
- hutnění 13 + 20 s na vibračním stole

- mícháno strojně, ručním míchadlem
- písek vysušený, štěrk 4-8 mm „mírně“ vlhký
- po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 53,8 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
- provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
- hutnění 2 x 15 s na vibračním stole

R5E	množství	jednotka	R6B	množství	jednotka
	1 m ³			1 m ³	
cement CEM II 32,5 R	325	kg	cement CEM II 32,5 R	325	kg
písek 0-4 mm Bratčice	1125	kg	písek 0-4 mm Bratčice	1125	kg
drť 4-8 Tovačov	380	kg	drť 4-8 Tovačov	253	kg
drť 8-16 Olbramovice	380	kg	drť 8-16 Olbramovice	253	kg
-	-	-	drť 16-22 Želešice	253	kg
skutečná voda	207,9	l	skutečná voda	219,2	l
vodní součinitel v/c	0,64	-	vodní součinitel v/c	0,68	-

- mícháno strojně, ručním míchadlem
- písek vysušený, štěrk 4-8 mm „mírně“ vlhký, štěrk 8-16 vysušený
- po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 37,9 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
- provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
- hutnění 15 + 20 s na vibračním stole

- mícháno strojně, ručním míchadlem
- písek vysušený, štěrk 4-8 mm „mírně“ vlhký, štěrk 8-16 a 16-22 mm vysušený
- po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 49,2 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
- provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
- hutnění 2 x 15 s na vibračním stole

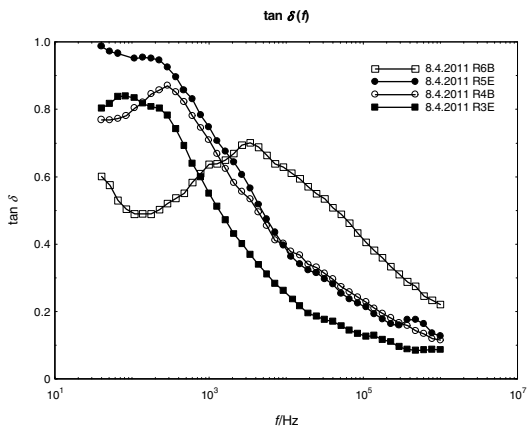
Tab. 1 Receptury jednotlivých směsí betonu
Tab. 1 Formulas for the different concrete mixes

3. Experiment

Vzorky betonových plátů byly postupně vkládány do přípravku (viz. Obr. 2) mezi 2 mosazné elektrody o rozměrech 40x25 mm (přitlačeny pomocí šroubového mechanismu) a podrobeny impedanční analýze. Vzhledem k tomu, že se jedná o srovnávací metodu, tak je třeba, aby povrchy měřených vzorků měli stejnou drsnost a pokud možno celoplošnou přilnavost k elektrodám. Vstupní napětí bylo 5 V a měřený frekvenční rozsah 40 Hz – 1 MHz.

4. Výsledky měření

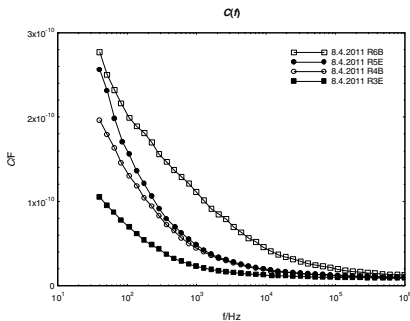
V grafech se od sebe liší křivky čtyř směsí. Nejvyšší hodnoty ztrátového činitele (Obr. 4) se vyskytují při nižších frekvencích budícího signálu, pro vyšší hodnoty použitých frekvencí pozorujeme klesající hodnoty ztrátového činitele. První detekované lokální maximum identifikujeme pro směs R3 nejbliže k levému konci frekvenční škály, druhé lokální maximum se nachází vpravo od prvního a odpovídá směsi R4. Křivka ztrátového činitele pro směs R5 je v oblasti frekvencí do 10 kHz položena nepatrně výše, než křivka pro směsi R4, křivky se téměř prolínají, mimo oblast nejnižších frekvencí. Lokální maximum ztrátového činitele pro směs R6 se nachází vpravo od uvedených maxim ostatních směsí, pozorujeme jej kolem frekvence 4 kHz. Měřené směsi se liší frakcí použitého kameniva, podle spekter ztrátového činitele usuzujeme na souvislost mezi frakcí kameniva ve směsi betonu a polohou lokálního maxima ztrátového činitele dále k vyšším frekvencím. Hodnota ztrátového činitele v takovém maximu je pro použité směsi poměrně blízká, na vzájemnou závislost mezi hodnotou $\tan \delta$ a frakcí zatím neusuzujeme.



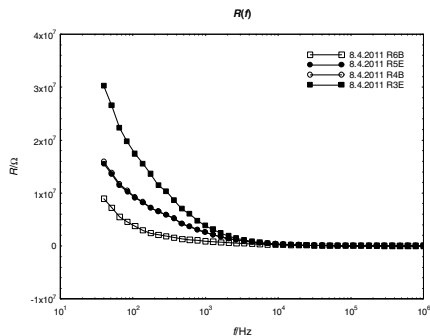
Obr. 4 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci
Fig. 4 Loss factor versus frequency diagram

Přítomnost maxim ve spektrech indikuje dominanci polarizačních ztrát, jejich klesající výběžky napovídají o vodivostních ztrátách.

Graf (Obr. 5), závislost elektrické kapacity vzorků na frekvenci obsahuje plynulé křivky, výrazně se odlišující v oblasti frekvencí 40 Hz až 10 kHz, ve zbylé části spektra jsou rozdíly minimální.



Obr. 5 Graf závislosti kapacity na frekvenci
Fig. 5 Capacitance vs. frequency plot



Obr. 6 Graf závislosti odporu na frekvenci
Fig. 6 Resistance vs. frequency plot

Nejvyšší hodnoty byly naměřeny pro směs s největší frakcí kameniva, s klesající frakcí byla zaznamenána nižší hodnota elektrické kapacity vzorků. Statická permitivita ϵ_0 je vyšší u směsi s vyšší frakcí, usuzováno z hodnot elektrické kapacity.

Elektrický odpor vzorků pro různé hodnoty frekvence budícího signálu elektrického napětí má opačný trend než v předchozím případě. Hodnoty odporu jsou pro vyšší frakci nižší, pro vzorky 4 a 5 téměř splývají. Odlišnosti křivek lze pozorovat pouze v rozsahu frekvencí 40 Hz až 1 kHz. Ve zbylé části spektra jsou hodnoty na hranici měřitelnosti.

	Kapacita vzorku při frekvenci 1000 Hz C/pF	Odpor vzorku při frekvenci 1000 Hz $R/M\Omega$	Absolutní hodnota impedance při frekvenci 1000 Hz $ Z /M\Omega$	Ztrátový činitel při frekvenci 1000 Hz $\tan \delta'$	Fázorový úhel při frekvenci 1000 Hz $-\varphi^\circ$
R3E	22,90	3,80	3,81	0,55	2,28
R4B	44,20	2,56	2,57	0,71	1,56
R5E	48,30	2,44	2,45	0,74	1,45
R6B	111,0	0,90	0,91	0,63	1,46

Tab. 2 Elektrické parametry pro zvolenou (referenční) frekvenci 1000 Hz

Tab. 2 Electric parameters for selected (reference) frequency of 1000 Hz

Tabulka 2 vyjadřuje souhrnně jednotlivé hodnoty elektrických veličin vzorků pro zvolenou frekvenci 1 kHz. Hodnoty elektrické kapacity odpovídají trendu pozorovanému ve spektrech, stejně tak hodnoty elektrického odporu. Hodnoty velikosti impedance s rostoucí frakcí klesají, stejně jako u elektrického odporu, což odpovídá převaze reálné složky a je to v souladu se zjištěným fázovým úhlem vzorků při zvolené frekvenci.

Měření vystihují elektrické vlastnosti materiálu uvnitř betonových plátů a je tedy splněn předpoklad, že zvyšující se kapacita vzorku a současně snižující se odpor vzorku má za následek snižování absolutní hodnoty impedance.

Z hodnot fázového úhlu a ztrátového činitele pro frekvenci 1 kHz však nelze usuzovat na souvislost s frakcí kameniva ve vzorcích. Frekvence 1 kHz se ukazuje jako

nehodná pro rychlé vyhodnocování elektrických parametrů materiálů na cementové bázi s podobným složením.

Měření vzorky byly v suchém stavu také podrobeny kontrole reprodukovatelnosti v různých časových obdobích. Křivky se s minimální odchylkou opakovaly, což svědčí o reprodukovatelnosti této metody.

5. Závěr

Metodou impedanční spektroskopie provedena charakterizace vzorků betonu na cementové bázi, odlišujícími se přísádky kameniva s rozdílnou frakcí. Pozorovanými vzorky byly tenké pláty, elektrody byly přitlačeny na stěny. Byla nalezena spojitost mezi frakcí kameniva a elektrickou kapacitou vzorků, mezi polohou lokálního maxima ztrátového činitele a zastoupenou frakcí. Souvislost vodního součinitele s elektrickými parametry zde nebyla pozorována.

Poděkování

Tento výzkum byl proveden jako součást projektu GAČR **P104/10/P012** "Impedanční spektroskopie betonu s různými stupni kapilárních pórů" a **P104/11/0734** "Využití elektromagnetické emise ve výzkumu moderních kompozitních materiálů pro konstrukční aplikace". 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] Kusák, I., Luňák, M., Impedance Spectroscopy of Ceramic (Plain) Roofing Tiles, příspěvek na konferenci I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist Intertech 2009, ISBN 978-83-926896-0-7, Politechnika Poznan, Poznan, Polsko, 2009
- [3] Kusák, I., Luňák, M., Pazdera, L., *Impedanční spektroskopie samozhutitelného betonu při tuhnutí*, in: NDT Welding Bulletin 2/2008, ročník 18, 22-25, vydáno 10.2008, ISSN 1213-3825
- [4] Luňák, M., Kusák, I., Pazdera, L., Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy, příspěvek na konferenci The 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering", ISBN 978-961-90610-7-7, Slovensko drustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [5] Kusák, I., Luňák, M., Matysík, M.; Topolář, L., *Stanovení topného faktoru tepelného čerpadla*, článek v Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [6] Luňák, M., Kusák, I.: *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124, Politechnika Poznan, Polsko, 2008, ISBN 978-83-926896-0-7
- [7] Luňák, M., Kusák, I., Debye's model of impedance spectroscopy, příspěvek na konferenci II International Interdisciplinary Technical Conference of young scientist Proceedings, ISBN 978-83-926896-1-4, Uczelniany Samorzad Doktorantow Politechniki Poznanskiej, Poznan, 2009
- [8] 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

