



CHOVÁNÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI BUILDING MATERIALS PROPERTIES CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD

Ivo KUSÁK*, 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, lunak@dp.fce.vutbr.cz

Abstrakt

Sledování procesu hydratace betonu v odlišných okolních podmínkách metodou impedanční spektroskopie se v literatuře vyskytuje zřídka. Méně často jsou prováděna sledování zrání betonu uvedenou metodou, kdy měrný odpor směsi přesahuje hodnoty 500 k Ω . Na základě Debyeovy teorie vznikly modely dielektrika, jejich aplikací a obdrženými parametry dielektrika je charakterizován měřený materiál a diskutována jednoznačnost určení hodnot parametrů modelu.

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

Abstract

The concrete hydration by miscellaneous ambient conditions monitoring by impedance spectroscopy occurs rarely in papers. When specific resistance of mixture exceeds 500 k Ω , the impedance measurements of concrete maturing are used less commonly. The Debye theory of dielectric relaxation is the basis of many models of dielectric materials. The measured samples are described by characteristics of models obtain by using them. The uniqueness of solution and pertinency of characterisation are involved.

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

1. Úvod

Analýza impedančních spekter nehomogenních materiálů ve stavebnictví je doposud nerozvinutá část metody impedanční spektroskopie. V současnosti nelze jednoznačně určit příspěvky jednotlivých složek materiálu k celkové vodivosti a polarizaci při různých frekvencích budícího elektrického pole. Materiál o vyšších hodnotách měrného odporu (>500k Ω) lze pojímat při vhodném zjednodušení jako dielektrikum. Pro homogenní materiály vybuoval teorii polarizace dielektrika Debye [12, 13]. 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 permittivity. Debye odvodil pro slabě polární kapalná dielektrika vztah pro komplexní relativní permittivitu, ozn. ϵ^* :

$$\epsilon^*(j\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

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

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

$$\text{tg}\delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = -\frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{\epsilon_s + \epsilon_\infty + \omega^2\tau^2} \quad (2)$$

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 permittivitu následovně:

$$\epsilon^*(j\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha}} \quad (3)$$

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 [13] nastínil ekvivalenci mezi tvarem výrazů pro komplexní relativní permittivitu ve smyslu (1), (3) a rovnic pro komplexní impedanci Z . Matematicky byly odvozeny vztahy pro reálnou a imaginární složku komplexní relativní permittivity 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 .

2. 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:

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

Tab. 1 Složení použitých vzorků betonu (množství v kilogramech)
 Tab. 1 Composition of the specimens measured (quantities in kg)

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

3. 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.

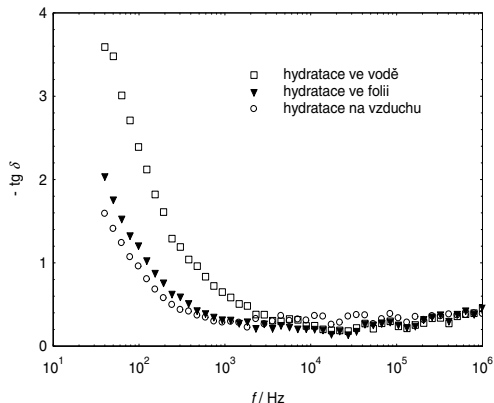
Z modelů byly určeny hodnoty koeficientů, uvedených v tabulce 2 a diskutovaných dále.

4. 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.

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. Nejbliže 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

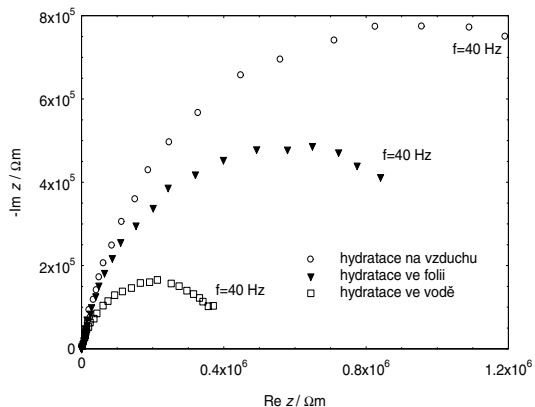
a navlhém stavu metodou impedanční spektroskopie [1]. Na konci článku bude srovnání uvedených rozborů spektra se závěry na základě modelů.



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

Fig. 1 Specific impedance values for the specimen under investigation at the time of the impedance spectroscopy method application

Změřená spektra hodnot měrné impedance pro sledovaný materiál jsou v souladu s teorií (Coleovi, Macdonald) půlkružnice [12, 13], jejichž střed je stlačen pod vodorovnou osu. Obrázek 2.



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

Fig. 2 Specific impedance values for the specimen under investigation at the time of the impedance spectroscopy method application

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.

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

Tab. 2 Loss factor and specific impedance spectra values for specimens of concrete that have hydrated in various environments

Prostředí hydratace	voda	folie	vzduch
ϵ_n	72,3	91,6	99,8
ϵ_s	$5,3 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$
τ [s]	6,4	0,964	0,473
α	0,114	0,176	0,268
r	0,9924	0,9621	0,8837
N	46	46	46

Ze spektra ztrátového činitele byly získány hodnoty komplexní relativní permitivity 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.

4. 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 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.

Příspěvek vznikl za podpory projektu „SUPMAT – Podpora pracovníků center pokročilých stavebních materiálů“. Registrační číslo projektu **CZ.1.07./2.3.00/20.0111**. Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Literatura

- [1] Kusák, I.; Luňák, M., *Tracking of concrete by means of impedance spectroscopy - electrical properties and porosity*, contribution at Proceedings of the 5th International Conference on dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, ISBN 978-80-554-0354-0, University of Žilina, 2011
- [2] Plšková, I.; Chobola, Z.; Matysík, M., *Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method*, *Ceramics-Silikáty* 55 [2] 2011, 176-182, ISSN 0862-5468, 2011
- [3] Luňák, M.; Kusák, I., *An application for the impedance spectroscopy method and building material testing*, Ministry of transport, ISSN 1802-971X, Brno, 2010
- [4] Kusák, I., Luňák, M., Matysík, M.; Topolář, L., *Determination of the performance factor of a heat pump* (in Czech), paper in *Media4u Magazine*, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [5] Pazdera, L.; Topolář, L.; Bílek, V.; Smutný, J.; Kusák, I.; Luňák, M., *Measuring of Concrete Properties during Hardening*, In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 311 - 318. ISBN 978-80-244-2533-7, 2010
- [6] Luňák, M.; Kusák, I.; Pazdera L.; Topolář, L., Bílek V., *Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties*, In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 233-240. ISBN: 978-80-244-2533-7, 2010
- [7] Kusák, I.; Luňák, M., *Impedance Spectroscopy of Ceramic (Plain) Roofing Tiles*, paper in I. International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist Intertech 2009, ISBN 978-83-926896-0-7, Politechnika Poznan, Poznan, Polsko, 2009
- [8] Luňák, M.; Kusák, I., *Debye's model of impedance spectroscopy*, presented in the 2nd International Interdisciplinary Technical Conference of young scientist Proceedings, ISBN 978-83-926896-1-4, Uczelniany Samorząd Doktorantów Politechniki Poznańskiej, Poznan, 2009
- [9] Luňák, M.; Kusák, I.; Pazdera, L., *Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy*, presented at the 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Desructive Testing in Engineering", ISBN 978-961-90610-7-7, Slovensko drustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [10] Kusák, I.; Luňák, M.; Pazdera, L., *Impedance spectroscopy of self-compactible concrete during the setting process* in: NDT Welding Bulletin 2/2008, Volume 18, 22-25, issued in 10/2008, ISSN 1213-3825, 2008
- [11] Luňák, M.; Kusák, I., *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124, Politechnika Poznan, Polsko, ISBN 978-83-926896-0-7, 2008
- [12] Mentlík, V: *Dielektrické prvky a systémy*, BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-189-6.
- [13] Macdonald, J., R.: *Impedance spectroscopy, emphasizing solid materials and systems*, bibliography, Canada 1987.