



STANOVENÍ NEJISTOT PRIMÁRNÍ KALIBRACE SNÍMAČŮ AKUSTICKÉ EMISE

Jiří KEPRT, Petr BENEŠ

FEKT VUT Brno, Ústav automatizace a měřicí techniky, ČR

Abstract

The paper reviews the background of the primary calibration of acoustic emission sensors and the determination of uncertainty by this calibration. There are discussed the aims and the purpose of the primary calibration and main sources of uncertainty in practical usage of calibration results.

The comparison of the results of the both method is presented. There shape of calibration characteristics corresponds well. Uncertainty of measurement by primary calibration is determined and presented in the paper. The uncertainty in reciprocity calibration of UT 1000 in range from 60 kHz to 285 kHz was ± 3 dB and from 285 kHz to 1 MHz up to ± 8 dB and the same in the calibration by step function. The calculation of the uncertainty doesn't include all the possible sources. Supplement of these sources will be the content of the next research.

Also the main problems, that were solved and have to be solved, are presented.

Abstrakt

Příspěvek se zabývá problematikou primární kalibrace snímačů AE a stanovení nejistot při této kalibraci. Je diskutován význam a cíle kalibrace snímačů AE a hlavní zdroje problémů při praktickém využití výsledků kalibrace.

V příspěvku je provedeno srovnání výsledků jednotlivých metod. Průběh frekvenčních charakteristik snímačů naměřených oběma metodami je v dobré shodě do 500 kHz. Nejistota při primární reciproční kalibraci snímače UT 1000 byla stanovena v rozsahu od 60 kHz do 285 kHz v pásmu ± 3 dB a od 285 kHz do 1 MHz v pásmu až ± 8 dB. Při kalibraci skokovou funkcí byla nejistota stanovena v rozsahu od 60 kHz do 285 kHz v pásmu ± 3 dB a od 285 kHz do 1 MHz v pásmu až ± 8 dB. Do výpočtu nejistot nebyly zahrnuty všechny zdroje přicházející v úvahu. Doplnění těchto zdrojů je náplní dalších prováděných experimentů.

V článku jsou dále uvedeny hlavní problémové oblasti, které musely být vyřešeny nebo se musí ještě řešit.

Klíčová slova

Akustická emise, kalibrace snímačů, nejistoty

1. Úvod

Podmínkou úspěšného nasazení metody AE v praxi je nejen důkladné pochopení fyzikálního pozadí principu generování AE probíhajícím dějem, ale i akceptování omezení daných náhodným charakterem vzniku a šíření AE a v neposlední řadě i omezení daných konkrétním technickým řešením měřicí aparatury a snímače AE. Právě snímač AE je v mnoha aplikacích nejkritičtější a nejdůležitější částí měřicího řetězce, neboť na něm závisí v rozhodující míře kvalita získávaných dat. Měření a optimalizaci technických parametrů snímače AE a časové stálosti těchto parametrů je nutné věnovat maximální pozornost.

Náš příspěvek úzce navazuje na loňskou Defektoskopii, kde bylo podrobně popsáno pracoviště umožňující primární kalibraci snímačů AE skokovou funkcí dle ASTM E1106 a primární kalibraci reciproční metodou dle NDIS 2109. V letošním roce jsme se zaměřili především na stanovení nejistot při kalibraci snímačů AE – jinými slovy, jak věrohodné jsou naměřené charakteristiky, co všechno ovlivňuje získané charakteristiky, která část představuje nejslabší místo a jakým způsobem kalibraci provádět, aby „rozptyl“ hodnot byl co nejnižší. Dalším cílem bylo též porovnat výsledky získané dle obou možných postupů primární kalibrace.

2. Snímače AE a jejich kalibrace, měřicí pracoviště

V této kapitole jen velmi stručně shrneme obsah našeho loňského příspěvku, který byl věnován obecnému popisu kalibračního pracoviště. Cílem primární kalibrace snímačů AE je získat frekvenční odezvu snímače na přichozí vlnu, která způsobí normálovou výchylku povrchu v místě snímače na známý signál. Odezva snímače je zjišťována v diskrétních krocích v intervalu přibližně od 10 kHz do 1 MHz. Vstup je dán zaváděnou dynamickou výchylkou povrchu kolmou na sledovaný povrch. Výsledkem kalibrace je frekvenční a fázová závislost výstupního napětí vztaženého na jednotku mechanického vstupního signálu (výchylka, rychlost, zrychlení).

Na našem pracovišti jsou implementovány obě základní ve světě používané metody primární kalibrace – reciproční a kalibrace skokovou funkcí. Reciproční kalibrace funguje na principu reciprocity, jak je znám z elektrických obvodů, využívá se toho, že běžné piezoelektrické snímače mohou pracovat též i jako generátor signálu. Postupnou záměnou, kdy vždy jeden snímač je ve funkci vysílače a dva ve funkci přijímače, lze vypočítat frekvenční charakteristiky všech snímačů. Hlavní výhodou reciproční kalibrace je, že není třeba měřit vstupní výchylku nebo působící sílu. Ovšem je nutné znát přenosovou (Greenovu) funkci testovacího bloku.

Základem kalibrace skokovou funkcí je znalost výchylky povrchu testovacího bloku v místě umístění snímače. Skokové uvolnění síly bodově působící na povrchu testovacího bloku vyvolá mechanickou poruchu, která se blokem dále šíří. Výchylka volného povrchu testovacího bloku může být určena teoreticky – výpočtem (jak tomu bylo v našem případě) nebo dostatečně věrným měřením absolutním snímačem výchylky o známé citlivosti, založeném obvykle na kapacitním principu. Při praktické realizaci je nekonečný poloprostor použitý pro výpočet aproximován válcovým ocelovým blokem a skoková funkce síly je aproximována lomem skleněné kapiláry o průměru menším než 0,2 mm. Je změřena velikost síly, kterou je lámána kapilára a vypočítána absolutní výchylka volného povrchu v požadovaném místě.

3. Analýza nejistot při reciproční kalibraci

V případě lineárních závislostí mezi vstupními proměnnými a výstupní hodnotou by stačilo brát v úvahu pouze jejich relativní přesnosti. Bohužel v našem případě je funkční závislost podstatně složitější, jak ukazuje vztah (1) pro výpočet jednoho bodu frekvenční charakteristiky druhého ze snímačů.

$$|F_2(f)| = \sqrt{\frac{1}{|H(f)|} \frac{|U_{12}(f)|}{|I_{12}(f)|} \frac{|U_{23}(f)|}{|I_{23}(f)|} \frac{|I_{31}(f)|}{|U_{31}(f)|}} \quad (1)$$

kde U je napětí[V], I je proud[A], H je reciproční parametr [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{N}^{-1}$] dle [6]

Byly tedy spočítány parciální derivace podle všech proměnných, tím jsme získali soustavu rovnic, která popisuje „citlivost“ výsledné vypočítané hodnoty na změny vstupních proměnných. Stanovení nejistot obecně spočívá v určení nejistoty typu A zahrnující vliv náhodných procesů a nejistoty typu B zahrnující vliv použité metody.

1. Nejistota typu A

Určení nejistoty typu A je založeno na sérii 10 měření, která jsou reprezentována jejich aritmetickým průměrem. Směrodatná odchylka jako charakteristika šíření náhodné veličiny je určena pomocí výběrové směrodatné odchylky od průměru. Nejlepším odhadem kladné druhé odmocniny rozptylu od aritmetického průměru je potom výběrová směrodatná odchylka, kterou lze v našem případě považovat za standardní nejistota typu A.

2. Nejistota typu B

Hlavním zdrojem nejistoty typu B je vektorový signálový analyzátor HP 89410A. Jeho absolutní přesnost v amplitudě je $\pm 0,5$ dB z plného rozsahu [13]. Přepočítáno na procenta může být chyba přístroje až 6% z rozsahu vstupního převodníku. Za předpokladu, že chyba má rovnoměrné rozložení, může být nejistota typu B spočítána dle (2)

$$s(x) = \frac{0,06 * \text{rozsah}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

2. Kombinovaná nejistota

Z důvodu toho, že měření napětí a proudu v každé dvojici probíhalo simultánně, předpokládala se závislost chyb minimálně mezi dvěma vstupními veličinami. Byla spočítána korelace pro všechny možné případy a výsledná nejistota byla určena podle vztahu

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i^{(k)}} \frac{\partial f}{\partial x_j^{(k)}} u(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_i^{(k)}} \frac{\partial f}{\partial x_j^{(k)}} u(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) = u_A(x_i, x_j) \quad (4)$$

2. Rozšířená nejistota

Kombinované standardní nejistoty může být používáno k vyjádření nejistoty výsledku měření. Avšak u některých aplikací je potřeba udat míru nejistoty, která definuje interval okolo výsledku měření s určitou pravděpodobností. Koeficient krytí byl volen tak, aby pravděpodobnost pokrytí byla nejméně 95 % - tzn. Hodnota koeficientu krytí byla 2.

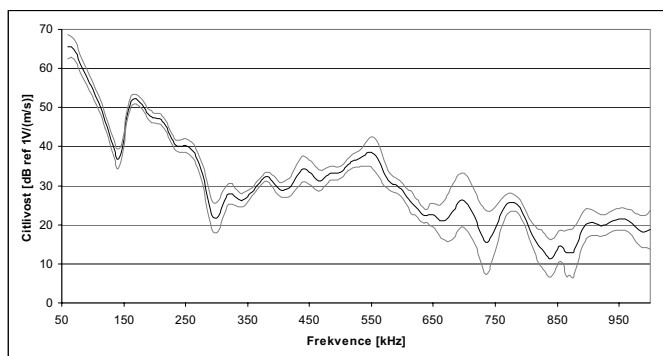
3.

2. Výsledky

Nejistota typu A byla určena pro všechna měření napětí a proudu. Nejistota proudové sondy Textronix typu A byla určena z naměřených charakteristik. Nejistota typu B byla získána z údajů výrobce vektorového signálového analyzátoru HP 89410A, kterým byla prováděna všechna měření. Tato nejistota byla určena pro všechny proudy a napětí. Potom byla spočítána kombinovaná nejistota a konečně rozšířená nejistota.

Charakteristika proudové sondy Textronix P 6022 byla určena z deseti měření pomocí aritmetického průměru. Napětí na proudové sondě bylo porovnáváno s napětím na rezistoru se známou frekvenční charakteristikou odporu. Tvar buzení byl stejný, jaké používáme pro buzení snímače AE při reciproční kalibraci. Všechna data naměřená proudovou sondou byla korigována pomocí naměřené charakteristiky a nejistota sondy byla zahrnuta do kombinované nejistoty.

Výsledná analýza nejistot zatím nepostihuje všechny možné zdroje jako např. variace vstupních koeficientů pro výpočet recipročního parametru, vliv změny materiálových konstant testovacího bloku vlivem teploty okolí, vliv rozmístění snímačů, přítláčné síly, vazebního média apod. Zahrnutí těchto zdrojů je náplní dalších experimentů.



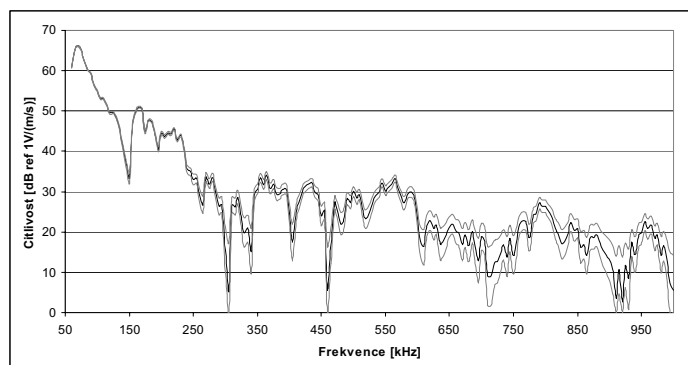
obr. 1 Absolutní frekvenční charakteristika snímače UT 1000 určená reciproční kalibrací z 10 měření včetně nejistot měření

4. Analýza nejistot při kalibraci skokovou funkcí

Výpočty pro určení nejistoty při reciproční kalibraci vycházejí ze základního vztahu pro určení charakteristiky snímače

$$U = \frac{FFT(U_{nez})}{FFT(U_{ref})} \quad (5)$$

kde U_{nez} je průběh napětí na kalibrovaném snímači [V], U_{ref} je průběh napětí na referenčním snímači [V], příp. určený výpočtem. Problémem při určení nejistoty v tomto případě bylo její šíření skrze algoritmus rychlé fourierovy transformace – FFT. Ve výpočtech se vycházelo z [17]. Byla vypočtena nejistota typu A a B pro kalibrovaný snímač a poté kombinovaná nejistota. Na závěr byla vypočtena rozšířená nejistota s koeficientem krytí 2.



obr. 2 Absolutní frekvenční charakteristika snímače UT 1000 určená kalibrační skokovou funkcí z 10 měření včetně nejistot

Výsledná analýza nejistot zatím nepostihuje všechny možné zdroje jako např. vliv tloušťky lámané kapiláry, vliv odchylky reálného signálu lomu od vypočteného atd. Zahrnutí těchto zdrojů je náplní dalšího bádání.

5. Závěr

Práce se zabývá metodami primární kalibrace snímačů AE a určením nejistot při této kalibraci. Navazuje na výsledky publikované na Defektoskopii 2006 [11]. V příspěvku je provedeno srovnání výsledků jednotlivých metod. Průběh frekvenčních charakteristik snímačů naměřených oběma metodami je v dobré shodě do 500 kHz. V rámci práce je podrobně popsán výpočet nejistot při reciproční kalibraci, kdy výsledná nejistota při primární reciproční kalibraci snímače UT 1000 byla stanovena v rozsahu od 60 kHz do 285 kHz v pásmu ± 3 dB a od 285 kHz do 1 MHz v pásmu až ± 8 dB. Při kalibraci skokovou funkcí byla nejistota stanovena v rozsahu od 60 kHz do 285 kHz v pásmu ± 3 dB a od 285 kHz do 1 MHz v pásmu až ± 8 dB. Při určování nejistoty kalibrace skokovou funkcí byl řešen problém šíření nejistoty skrze rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Hlavním zdrojem nejistot při daných kalibracích je chyba vektorového signálového analyzátoru HP 89410A, jehož absolutní přesnost v amplitudě je dle manuálu $\pm 0,5$ dB z plného rozsahu.

Do výpočtu nejistot nebyly zahrnuty všechny možné zdroje jako např. variace vstupních koeficientů pro výpočet recipročního parametru, vliv tloušťky lámané kapiláry, vliv odchylky reálného signálu lomu od vypočteného atd. Doplnění těchto zdrojů je náplní dalšího výzkumu.

Poděkování

Pracoviště pro primární kalibraci snímačů AE je dále rozšiřováno díky podpoře grantu GAČR 101/06/1689.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 1330–9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí.
- [2] ASTM Standard E750-88: Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation. ASTM, Philadelphia.
- [3] Scott, I. G.: Basic Acoustic Emission (Nondestructive Testing Monographs and Tracts, Volume 6). Montreux, Gordon and Breach Science Publishers, 1991.
- [4] Miller, R. K. - McIntre, P.: Acoustic Emission Testing (Nondestructive Testing Handbook, Volume 5). American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [5] ASTM Standard E1106-86: Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors. ASTM, Philadelphia.
- [6] NDIS 2109–91: Method for Absolute Calibration of Acoustic Emission Transducers by Reciprocity Technique. The Japanese Society For Non-Destructive Inspection, 1991.
- [7] ASTM Standard E1781-96: Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors. ASTM, Philadelphia.
- [8] ASTM Standard E976-84(88): Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response. ASTM, Philadelphia.
- [9] Hatano, H – Chaya, T. – Watanabe, S. – Jinbo, K.: Reciprocity Calibration of Impulse Responses of Acoustic Emission Transducers. IEEE Transactions UFFC, Vol. 45, No. 5 (September 1998), pp 1221 – 1228.
- [10] Hill, R. – Adams, N. L.: Reinterpretation of the Reciprocity Theorem for the Calibration of Acoustic Emission Transducers Operating on a Solid. Acustica, Vol. 43 (1979), pp 305 – 312.
- [11] Keprt, J., Beneš, P., Kalibrace snímačů AE, Defektoskopie 2006. Tábor, 2006, p. 101 – 109, ISBN 80-216-3290-X
- [12] Hruška, K. - Bradík, J., Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti. VUT v Brně, 2001. 114 pages. ISBN 80-214-1656-1
- [13] HP 89410A/HP 89441A Operator's Guide, Hewlett-Packard Company, 1998
- [14] Laaneots, R., Mathiesen, O., An introduction to metrology, Estonia, 2006, ISBN 9985-59-609-9
- [15] Palenčár, R., Vdoleček, F., Halaj, Nejistoty v měření III: Nejistoty nepřímých měření, Automa 12, 2001, p. 28 -33
- [16] Novotný, M., Sedláček, Matlab a určování nejistoty efektivní hodnoty digitalizovaného signálu
- [17] Betta, G., Liguori, C., Pietrosanto, A., Propagation of uncertainty in a discrete Fourier transform algorithm, Elsevier Measurement 27, 2000, p. 231 -239

Kontakt

Ing. Jiří Keprt
Ústav automatizace a měřicí techniky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně
Kolejní 2906/4
612 00 Brno
Telefon: +420 541 141 122, +420 777 342 556
E-mail: keprt@feec.vutbr.cz