

## VLIV DĚLKY A TVARU VLNOVODŮ NA SNÍMÁNÍ AKUSTICKÉHO SIGNÁLU

M. Černý, P. Mazal, J. Filípek

**Došlo: 15. srpna 2007**

### Abstract

ČERNÝ, M., MAZAL, P., FILÍPEK, J.: *Sensing of the acoustic signal by waveguides*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2008, LVI, No. 1, pp. 43–54

The work is focused on the possibilities of acoustic emission (AE) signal sensing from surfaces inaccessible for commonly used sensors. The aim of the work is to verify the possibility of assembly of several measuring devices for maximalization of the possibilities of AE signal sensing in practice. For this purpose, samples of waveguides and sets of tools for their clamping with AE sensor have been constructed. These samples have been tested in laboratory conditions and functionality of the whole system has been validated in practise. Several sets of normalized AE signal measurements have been performed at all waveguides samples. The results have been evaluated from several points of view, concerning waveguide design. The results contributed to the knowledge of signal conduction through waveguide body, its changes and deformation. The results of evaluation has also confirmed that waveguide shape differences do not cause any critical failings. The possibility of further device set development have been confirmed.

acoustic emission, waveguide, non-destructive test

Nedestruktivní defektoskopie je oborem technické kontroly povrchových a vnitřních vad v materiálu bez porušení celistvosti výrobků. Metoda snímání akustické emise patří dnes k nejefektivnějším metodám nedestruktivní defektoskopie.

Pojem akustická emise (AE) označuje děj, při němž uvnitř materiálu spontánně vznikají napětové vlny zvukové až ultrazvukové frekvence v důsledku náhlého lokálního uvolnění energie. Pomocí snímání signálů AE je možné z četnosti registrovaných signálů určit stupeň poškození materiálu zatěžované konstrukce či součásti.

S vývojem výpočetní techniky rostou možnosti praktické aplikace a využití metody AE ve výrobním procesu, při sledování stavu složitých konstrukcí či součástí rozsáhlých konstrukčních soustav. Metoda AE umožňuje jak periodické kontroly, tak souvislý monitoring. Ve spojení s výpočetní technikou lze realizovat rozsáhlé sítě kontrolních bodů konstrukce či technického zařízení a jejich efektivní kontrolu v reálném čase z jednoho centralizovaného pracoviště. Vhodné rozmístění snímačů do defino-

vané sítě umožňuje velmi rychlou lokalizaci vznikajícího poškození materiálu.

Výsledky snímání signálu AE mohou informovat v nezpracované formě jednak o existenci a poloze vady materiálu, v případě použití vhodné transformace získaného signálu mohou též určit druh vady či poruchy.

Cílem výzkumu, který je popsán v tomto příspěvku, bylo zjištění modifikace signálu AE s ohledem na jeho snímání upravenými přípravky, které umožňují použití metody AE v praxi. Součástí práce je také návrh prototypu přípravku pro uchycení snímače a vlnovodu k měřené konstrukci či součásti.

### Vlnové jevy v elastickém prostředí

Každý silový účinek (plus napětí) se elasticky lineárním prostředím šíří jako postupná vlna vzniklá superpozicí množiny sinusových vln. Každý pohyb elementu lze popsat pohybovými rovnicemi, které mají v kartézské soustavě souřadnic tvar (Brepta a kol., 1994):

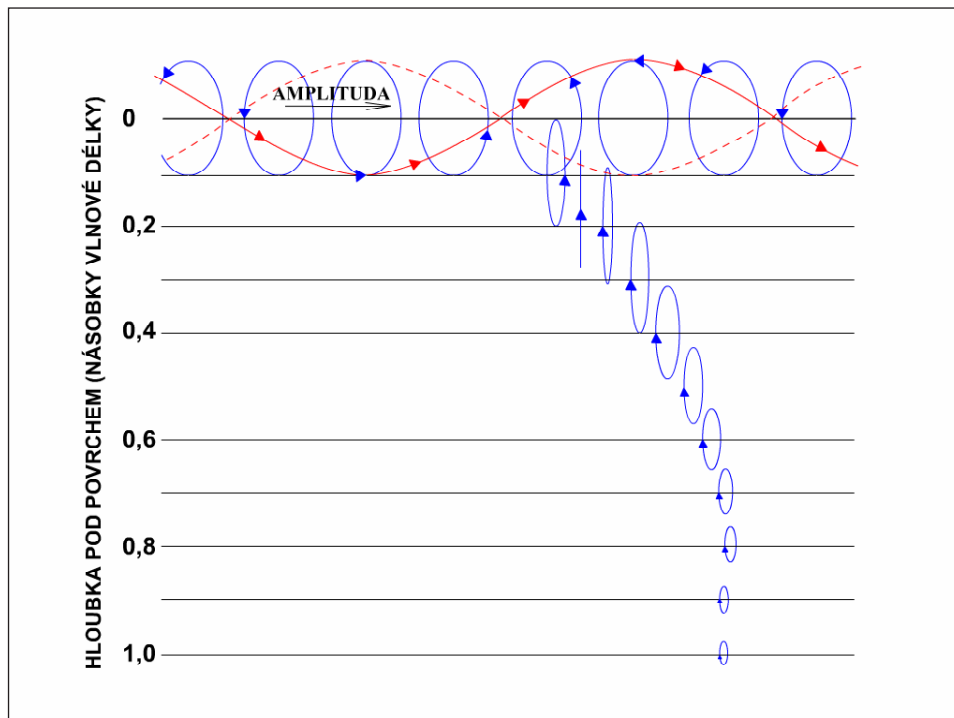
$$\begin{aligned}
\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} &= c_1^2 \frac{\delta \Delta}{\delta x} - 2c_2^2 \left( \frac{\delta \omega_z}{\delta y} - \frac{\delta \omega_y}{\delta z} \right) \\
\frac{\delta^2 v}{\delta t^2} &= c_1^2 \frac{\delta \Delta}{\delta y} - 2c_2^2 \left( \frac{\delta \omega_x}{\delta z} - \frac{\delta \omega_z}{\delta x} \right) \\
\frac{\delta^2 w}{\delta t^2} &= c_1^2 \frac{\delta \Delta}{\delta z} - 2c_2^2 \left( \frac{\delta \omega_y}{\delta x} - \frac{\delta \omega_x}{\delta y} \right)
\end{aligned} \quad (1)$$

Neomezeným pružným prostředím se mohou šířit jen dva typy tzv. rovinných vln. Termínem „rovinná vlna“ se vyjadřuje vlnění charakterizované tím, že v daném čase všechny elementy kontinua ležící v rovině kolmé na směr postupu vlny jsou ve fázi. Taková vlna vyvolá v prostředí posuv se složkami  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , které lze vyjádřit takto:

$$\begin{aligned}
u &= A_1 e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} (\nu_1 x + \nu_2 y + \nu_3 z \pm ct)} \\
v &= A_2 e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} (\dots)} \\
w &= A_3 e^{i \frac{2\pi}{\Lambda} (\dots)}
\end{aligned} \quad (2)$$

První z tzv. rovinných vln je příčná vlna (ekvivolumetrická), druhá je vlna dilatační (podélná, nerotační). Rychlosti obou vln nejsou závislé na směru postupu vlny (orientaci vlnové normály) – je to dáno izotropií elastického prostředí. Uvedené dva typy ro-

vinných vln jsou jediné, které se mohou neomezeným prostředím šířit; jejich objeviteli jsou Poisson a Stokes. Rychlost dilatační vlny je větší než rychlost podélné vlny v tenké tyči, protože v neomezeném prostředí je ve směru kolmém k postupu vlny potlačena možnost kontrakce, a prostředí je proto tužší (Brepta a kol., 1994). Jestliže má elastické prostředí hraniční rovinu (takový útvar se nazývá pružný poloprostor), šíří se podél této roviny (vlného povrchu) další typy vlnění; jedná se o Rayleighovy vlny. Tyto vlny postupují podél povrchu a jejich amplituda klesá exponenciálně s hloubkou pod povrchem; vyvolávají v pružném prostředí rovinné přetvoření. Jejich amplituda leží v rovině dané směrem postupu vlny a normálou k hraniční rovině (Obr. 1). Posuvy elementů kolmo k této rovině amplitud jsou nulové. Jejich rychlost nezávisí na vlnové délce, lze si je představit jako pohyb myšleného bodu po elipse, která se pohybuje stálou rychlostí rovnoběžně s povrchem. Přitom se poměr poloos této elipsy mění s hloubkou pod povrchem a to i vzhledem ke znaménku. Mění se proto smysl oběhu po myšlené elipse. Vlny vysokých frekvencí (malých vlnových délek) ztrácejí amplitudy posuvů rychleji v závislosti na hloubce. Z toho plyne, že u vysokofrekvenčních vln se energie jimi nesená transportuje v tenké zóně u povrchu (skin efekt – Brepta a kol., 1994).



1: Závislost amplitudy Rayleighových vln na hloubce pod povrchem

### Vlnění ve válcové tyči kruhového průřezu

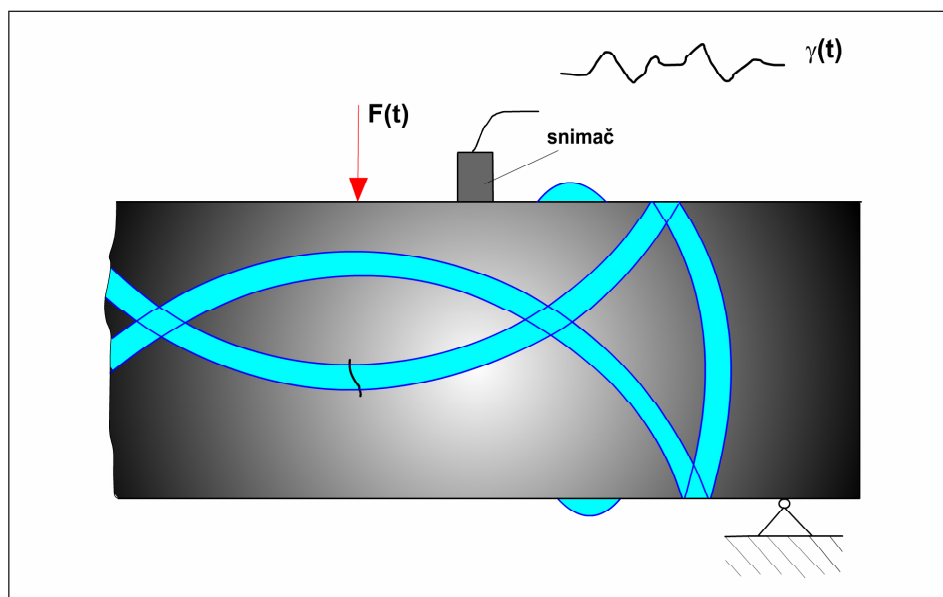
Řešení pohybu vln ve válcové tyči kruhového průřezu, za jediného omezujícího předpokladu, že je

nekonečně dlouhá, je modelovou situací pro akustické vlnovody (Obr. 2).

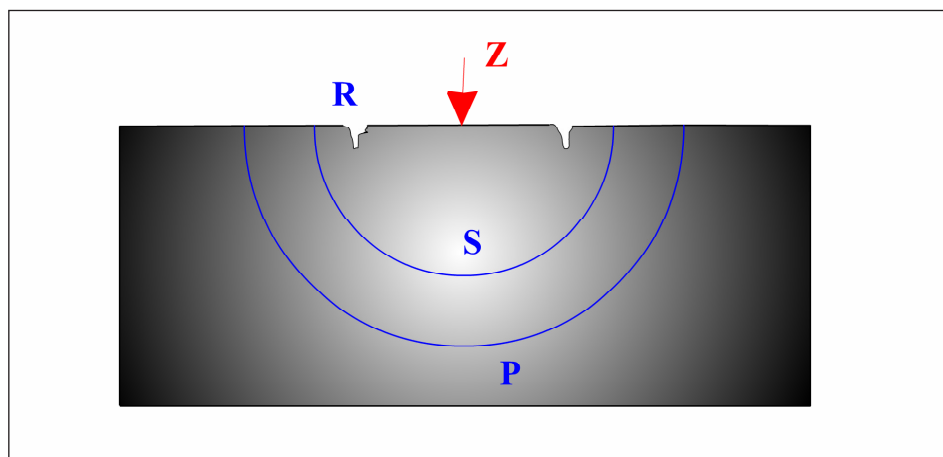


vratné deformace. Když je mechanické napětí dostatečně velké (lokálně dosahuje plastického stavu struktury), vznikají ve struktuře nevratné deformace. Obě napětí jsou spojena s akustickou emisí. Příčinou těchto napětí jsou např. vlivy mechanického zatížení, tlaku vyvolaného plynem či kapalinou, teplotního namáhání apod.

Akustická kulová vlna šířící se ze zdroje AE je po cestě modifikována vlivem rozptylu, odrazů a útlumů až k povrchu, kde je zaznamenána snímačem. Další změna tvaru signálu probíhá vlivem přeměny mechanického vlnění na elektrickou energii uvnitř těla snímače. Vlastní zaznamenaný signál AE je v poslední fázi upraven – zesílen, filtrován apod. (Pazdera a kol., 2004).



4: Zaznamenání elastické (akustické) vlny snímačem



5: Šíření vln v materiálu

(Z – zdroj vlny, S – příčná vlna, P – podélná vlna, R – povrchová vlna)

Rozsah aplikačních možností AE je velmi široký. Objemově největší je sledování emise při seismických projevech (zemětřesení), zatímco k nejmenším aplikačním procesům patří sledování pohybu několika dislokací v namáhaném materiálu. Mezi těmito extrémy je celá škála aplikací AE, jak v laboratorních podmínkách, tak zejména v průmyslovém nasazení.

Signály akustické emise přijímané snímači přiloženými na povrch součástí jsou většinou impulsy

povrchových vln (Rayleighových), proto je nelze přijímat ultrazvukovými sondami pro příčné nebo podélné vlny. Nejsou vhodné ani sondy pro povrchové vlny, protože jejich jmenovité (střední) frekvence jsou vyšší, než je pásmo, v němž se nejčastěji akustická emise vyskytuje. Snímače akustické emise využívají planárních kmitů, proto bývají naladěny na rezonanci odpovídající radiálním rozměrům měničů. Snímače AE mají pásmo snímání nastaveno

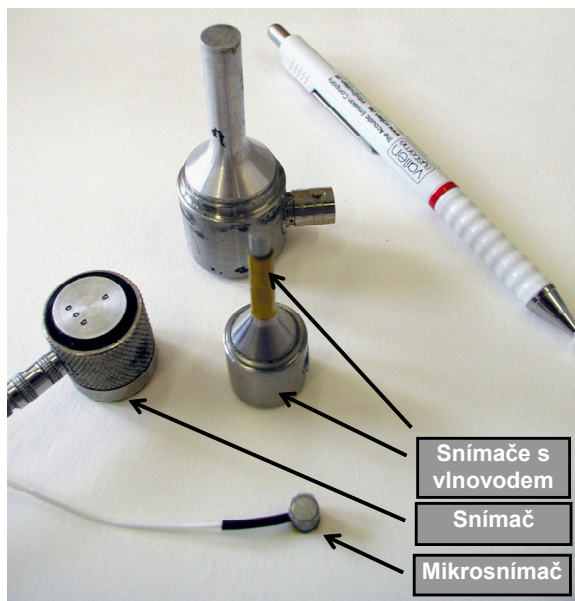
v rozmezí frekvencí 20 kHz–2 MHz. V laboratořích je nutné dodržet stupeň krytí snímače IP60, v průmyslu pro provozní podmínky IP66. Pro náročné aplikace jsou vhodné snímače v hermetickém provedení se stupněm krytí IP68 a dotyková plocha snímačů může být vyhotovena z niklované nebo nerezové oceli, respektive korundu (Weber, 1996).

Způsoby připojení snímačů AE ke sledovanému objektu:

- přímé lepení snímače na plochu
- magnetický držák
- šroubový spoj (vnější nebo vnitřní závit na snímači)
- navařený tyčový vlnovod
- pásová spona (použití na potrubních systémech).

### Vlnovody

V praxi se často vyskytuje problém, že snímač akustické emise nelze přímo umístit na sledovaný objekt (nepřístupnost místa, vysoká teplota povrchu sledovaného objektu apod.). V těchto případech se využívají vlnovody. Konstrukčně jsou řešeny tak, že jsou rozebíratelné, nebo mohou být trvalou součástí snímače. Příkladem konstrukce je snímač s pevně integrovaným vlnovodem, který zmenšuje dotykovou plochu snímače pro snímání AE na malých objektech. Volba materiálu vlnovodu závisí především na materiálu zkoušeného objektu a oba tyto materiály by měly mít stejnou akustickou impedanci z důvodů minimalizace odrazů AE vlny a lepšího přechodu vlny z objektu na vlnovod a dále do snímače. Změna průměru vlnovodu na průměr snímače bývá obvykle řešena kuželovitým přechodem. Nevýhodou použití vlnovodu je ztráta velikosti přenášeného signálu, jež je způsobena útlumem v materiálu a ztrátami na přechodu rozhraní.



6: Příklady konkrétních snímačů bez i s vlnovodem

Metodou AE lze zkoumat i betonové části konstrukce (např. mostní konstrukce – FAST VUT v Brně). S ohledem na uvedenou povahu šíření vln materiálem zřejmě není beton pro metodu AE ideální materiál. Mnohem vhodnější aplikací AE je zkoumání ocelové části stavební konstrukce (např. mostní). V praktických případech je evidentně ocelové jádro železobetonové konstrukce nedostupné právě přes betonový obal.

Zkoumané objekty jsou reprezentovány především jednotlivými prvky ucelené technologické soustavy. Zde je třeba zaměřit se na kritické body, které odpovídají různým nádobám namáhaným jak přetlakem, tak podtlakem, rozvodným potrubím pro tlaková či nebezpečná média a také mnohé reaktory.

Problém nastává, když je konkrétní součást uvedeného tlakového systému zakomponována do stavební konstrukce. Jedná se především o její betonový obal. Tento případ je svou povahou podobný výše popsanému problému snímání AE z ocelového jádra železobetonových mostních konstrukcí.

### MATERIÁL A METODY

#### Návrh konstrukčního řešení vlnovodu a jeho analýza

Vzhledem k situacím, jež mohou nastat při praktické aplikaci AE, by měla být pro praktická měření vytvořena sada vlnovodů s délkovou a materiálovou rozmanitostí odstupňovanou dle konkrétních poznatků získaných v oboru AE. Základ celé úvahy o tvorbě takovéto „sady“ je však třeba podrobit experimentálnímu zkoumání vlnovodů v laboratořích. V předložené práci bylo ověřeno, porovnáváno a vyhodnoceno chování různých vzorků vlnovodů v jasně definovaném prostředí a podmínkách. Jen tak je možné získat relevantní výsledky. Do jisté míry je neovlivnitelný aspekt identity materiálů. Materiálově by měl vlnovod odpovídat materiálu zkoumaného objektu.

Pozornost byla tedy zaměřena na konstrukční oblast – porovnání a vhodnou volbu různých délek vlnovodů bez ohledu na zkoumání materiálově rozdílných vzorků a také na experimentální návrh uchycení vlnovodu a sondy. Cílem je zjistit, zda je taková měřicí sada použitelná a případně předelat, jaká úskalí mohou při vývoji takové sady nastat, popř. s jakými problémy, odchylkami či odlišnostmi je třeba počítat při praktickém uplatnění, ať již z pohledu mechanické aplikace vlnovodů, či z pohledu zpracování naměřených dat.

S ohledem na fyzikální „blízkost“ většině běžně používaných ocelových materiálů a vhodné chemické složení, především poměru přísad, byla zvolena ocel 11 523 (vlnovod by mohl působit při nevhodné volbě jako tlumící člen). Délka vlnovodů s ohledem na použitelnost v praxi (tloušťka pokrytí betonem!) byla zvolena v intervalu 100 až 150 mm. Jako optimální snímaná plocha byl navržen kruhový průřez s průměrem 5 mm. Z pohledu snímače (fy Dakel) má styčná plocha průměr 15 mm. Tyto



snímače se vyznačují relativně masivní konstrukcí vhodnou pro terénní použití a jsou vybaveny zesilovačem signálu, což je pro samotné měření za ztížených podmínek zvláště výhodné.

Přechod z průměru 5 mm na průměr 15 mm byl pro experimentální účely zvolen dvojitý. Jednak nejčastěji používaný kuželový přechod mezi oběma válcovými plochami, druhou variantou byl přechod hyperbolický, kdy tvar hyperboly vychází z útlumové křivky. Výroba vlnovodů byla realizována na klasickém horizontálním soustruhu běžným třískovým obráběním, konečná povrchová úprava byla provedena broušením.



7: Vyrobené vlnovody

Následně byly navrženy přípravky pro stabilní uchycení vlnovodu a snímače jako celku ke zkoumanému objektu (např. mostní konstrukci). Jejich funkcí je vytvořit optimální přitlak snímače k vlnovodu a následně upevnit celek ke zkoumanému objektu (Obr. 8).

Měření probíhalo v laboratoři vybavené systémem Dakel (hardwarová část „XEDO“ + softwarová část „Daemon“). Metoda simulace zdroje akustické emise byla provedena pomocí Hsu-Nielsen – Source 0.5. „Pen test“ je postup založený na principu zlomení tuhy tloušťky 0,5 mm a tvrdosti 2H o povrch snímaného vzorku s pomocí mikrotužky se speciálním nástavcem (Obr. 9).

#### Sestavení měřicí aparatury

Ze sady snímačů AE byly dle kalibračního protokolu vybrány tři vhodné snímače s blízkou frekvenční závislostí. Celá sestava byla následně umístěna kolmo na ocelovou tyč o délce 700 mm a průřezu 65 × 65 mm. Při prvním měření byly instalovány vlnovody krátké (100 mm). Na první kanál snímačového zařízení byl připojen hyperbolický vlnovod, na druhý kuželový a na třetím kanále byl připojen snímač bez vlnovodu. Na všechny přechodové plochy byla aplikována speciální kontaktní hmota, která je určena k minimalizaci útlumu signálu při přechodu mezi jednotlivými prostředními (Obr. 10).

V programu Daemon je aktivováno ukládání snímaných událostí. Byly naměřeny dva kontrolní soubory událostí, z nichž každý obsahoval šest až sedm jednotlivých událostí. Následně byly instalovány vlnovody dlouhé (150 mm), přičemž byla zachována příslušnost jednotlivých kanálů snímačů a vlnovodů. Za tohoto sestavení byly opět naměřeny tři soubory, každý s obsahem sedmi událostí.

Uvedená sestava byla rovněž aplikována v terénu. Do betonové konstrukce s tlakovou nádobou (tloušťka betonu cca 75 mm) byly vyvrtány celkem čtyři otvory, jeden centrální pro vlnovod a tři po obvodu. Držák byl přichycen pomocí běžných hmoždinek a samořezných šroubů.

Z uvedených funkcí programu DaeShow byla využita tvorba časového grafu emisní události a její transformace metodou Hanning (Kreidl, Šmíd; 2006). Veškeré grafy jednotlivých emisních událostí a jejich transformací byly pro přehlednost a lepší orientaci ve výsledcích přeneseny do tabulky v programu Excel.

#### VÝSLEDKY A DISKUSE

Z porovnání grafů signálu je u obou druhů sestavení vlnovodů, tzn. jak krátkých, tak dlouhých, evidentní zeslabení signálu při použití vlnovodu oproti přímému umístění snímače (Obr. 13). Útlum naměřeného signálu při použití vlnovodu je s časovým průběhem mírně rostoucí, síla signálu naměřeného snímači prostřednictvím vlnovodu s časem klesá rychleji než u přímo umístěného snímače.

Rozdíl mezi intenzitou naměřeného signálu prostřednictvím přímého snímače a prostřednictvím vlnovodu je způsoben několika významnými faktory:

- útlum způsobený průchodem signálu tělem vlnovodu
- útlum na přechodových plochách
- poměr průřezů přechodových ploch zkušební tyče – vlnovod vs. zkušební tyče – snímač.

Při srovnání průběhu signálu prostřednictvím jednotlivých vlnovodů, tedy kuželového vs. hyperbolického, je u kuželového vlnovodu patrný vyšší útlum signálu především v počátku emisní události, méně již v jejím průběhu. Hyperbolický vlnovod lépe přenáší především počátek emisní události. Tento jev je shodný u obou délek vlnovodů. U vlnovodů s délkou 150 mm je rozdíl útlumů v neprospěch kuželového vlnovodu znatelnější.

Při porovnání z pohledu útlumu v závislosti na délce vlnovodu je u delších vlnovodů zřejmý pokles intenzity signálu (Obr. 14). Ovšem pokles není natolik výrazný, aby bylo znemožněno zaznamenat událost akustické emise.

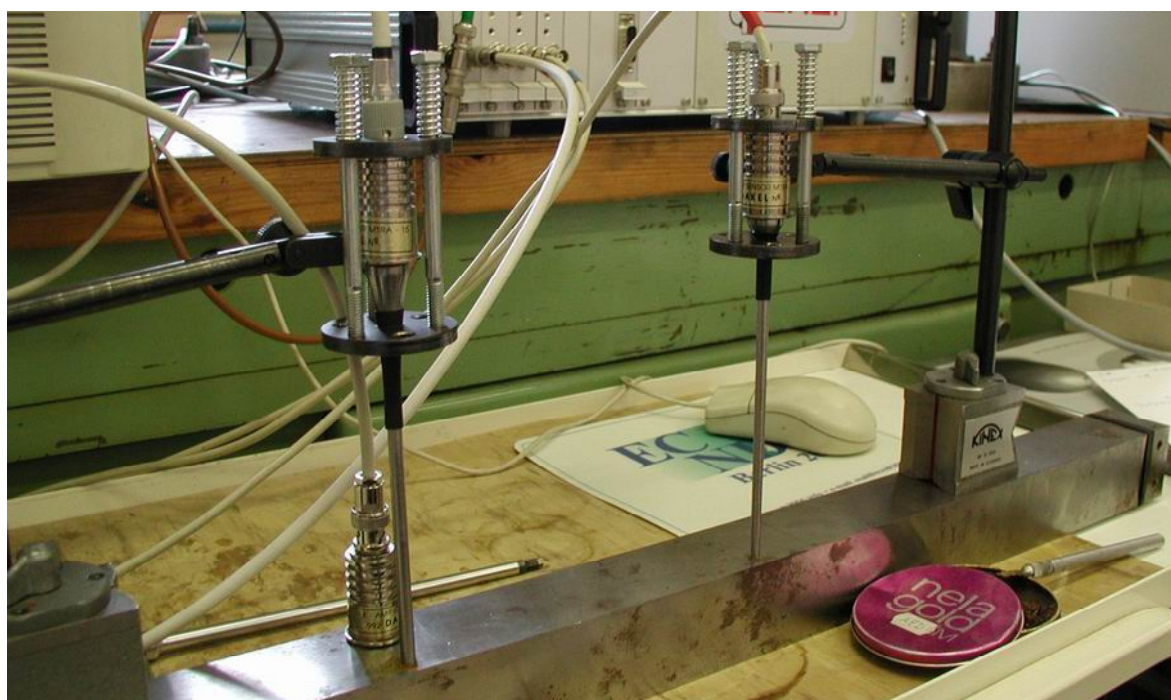
Porovnání transformací jednotlivých po sobě naměřených signálů prostřednictvím přímo umístěného vlnovodu potvrzuje funkci Hsu-Nielsenova zdroje (Pen testu) jakožto normalizovaného zdroje AE. Všechny tyto transformované signály mají shodné umístění špiček průběhu a u většiny se sho-



8: Uchycení snímače a vlnovodu v držáku



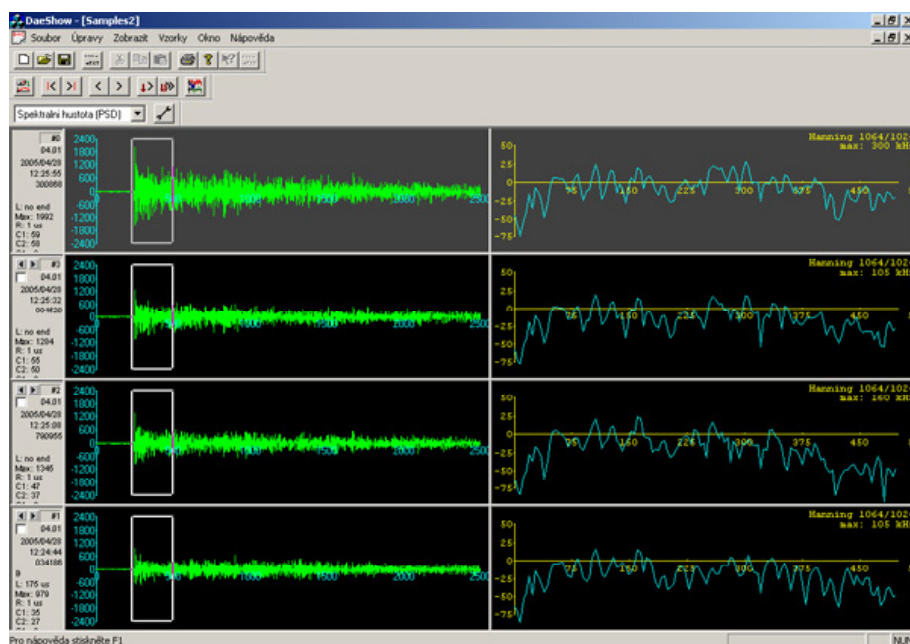
9: Ukázka Pen testu a výběr snímačů



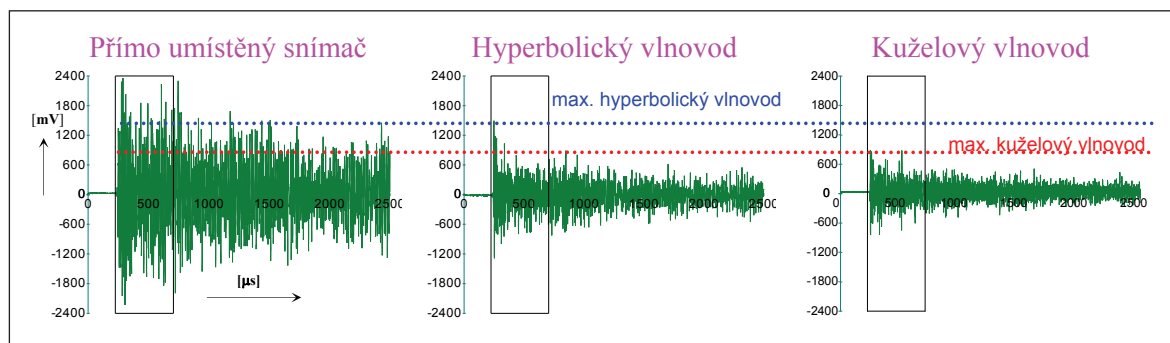
10: Sestavení vlnovodů na měřicí tyči



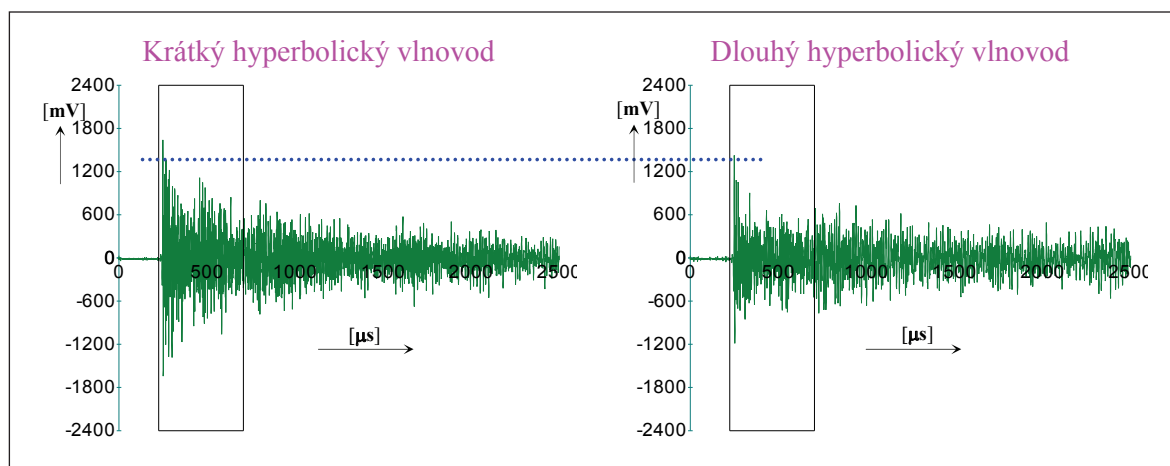
11: Přípravek instalovaný na betonové konstrukci



12: Screenshot okna programu DaeShow



13: Porovnání intenzity signálů snímač – vlnovody



14: Porovnání intenzity signálů dlouhých a krátkých vlnovodů



duje hodnota frekvence, v níž leží maximum síly signálu.

Při srovnání průběhu transformací mezi přímým snímačem a jednotlivými vlnovody se projevuje odlišnost průběhu signálu naměřeného prostřednictvím kuželového vlnovodu od signálu z přímého snímače a hyperbolického vlnovodu. Hyperbolický vlnovod vykazuje průběh téměř shodný s přímo umístěným snímačem.

Z průběhů grafů transformovaného signálu a především z hodnot max. frekvencí je patrná různorodost hodnot útlumů frekvencí v závislosti na konkrétním použitém vlnovodu. Příčina tkví v přechodu vln mezi jednotlivými prostředními. Při přechodu konkrétního vlnového signálu o určité frekvenci, resp. vlnové délce z jednoho prostředí do druhého je útlum signálu největší v případě, že přechod nastane v momentě nulové amplitudy. Naopak, je-li při přechodu amplituda maximální, je útlum nejmenší.

Z toho tedy vyplývá, že vlnovodem jsou nejméně tlumeny signály s frekvencí, jejíž polovina délky vlny odpovídá násobku délky vlnovodu a tedy vlny procházejí stykovou plochou v maximální amplitudě. Vlnění s frekvencí, jejíž násobek hodnoty  $\lambda/2$  neodpovídá délce vlnovodu, jsou více či méně tlumeny.

Vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci  $f$ .

$$\lambda = \frac{v}{f}, \left[ m = \frac{m \cdot s^{-1}}{s^{-1}} \right] \quad (3)$$

$v$  je rychlost šíření vlnění, v našem případě tedy:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \left[ m = \frac{m \cdot s^{-1}}{s^{-1}} \right] \quad (4)$$

$c$  – rychlost šíření v oceli ( $c = 5 \cdot 10^3 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Příklad konkrétního výpočtu:

$$\lambda = \frac{5 \cdot 10^3}{136 \cdot 10^4} = 0,00367 \text{ m} = 3,67 \text{ mm}$$

$$\lambda / 2 = 1,835 \text{ mm}.$$

K jevu dochází i při přímém přechodu vlnění ze zdroje AE do snímače, avšak pouze na jedné styčné ploše. Pravděpodobnost útlumu jednotlivých frekvencí je tak při jedné styčné ploše teoreticky poloviční. Útlumový jev vznikající při přechodu vlnění z jednoho prostředí do jiného prostředí však nemá zásadní vliv na zachycení, a tedy i detekci emisní události.

## ZÁVĚR

Na základě získaných výsledků je možné určit několik následujících bodů – zásad a doporučení pro další vývoj sad vlnovodů. Je zřejmé, že je nutné položit důraz nejen na vhodnou volbu materiálu vlnovodu s ohledem na předpokládanou aplikaci sady, ale i na:

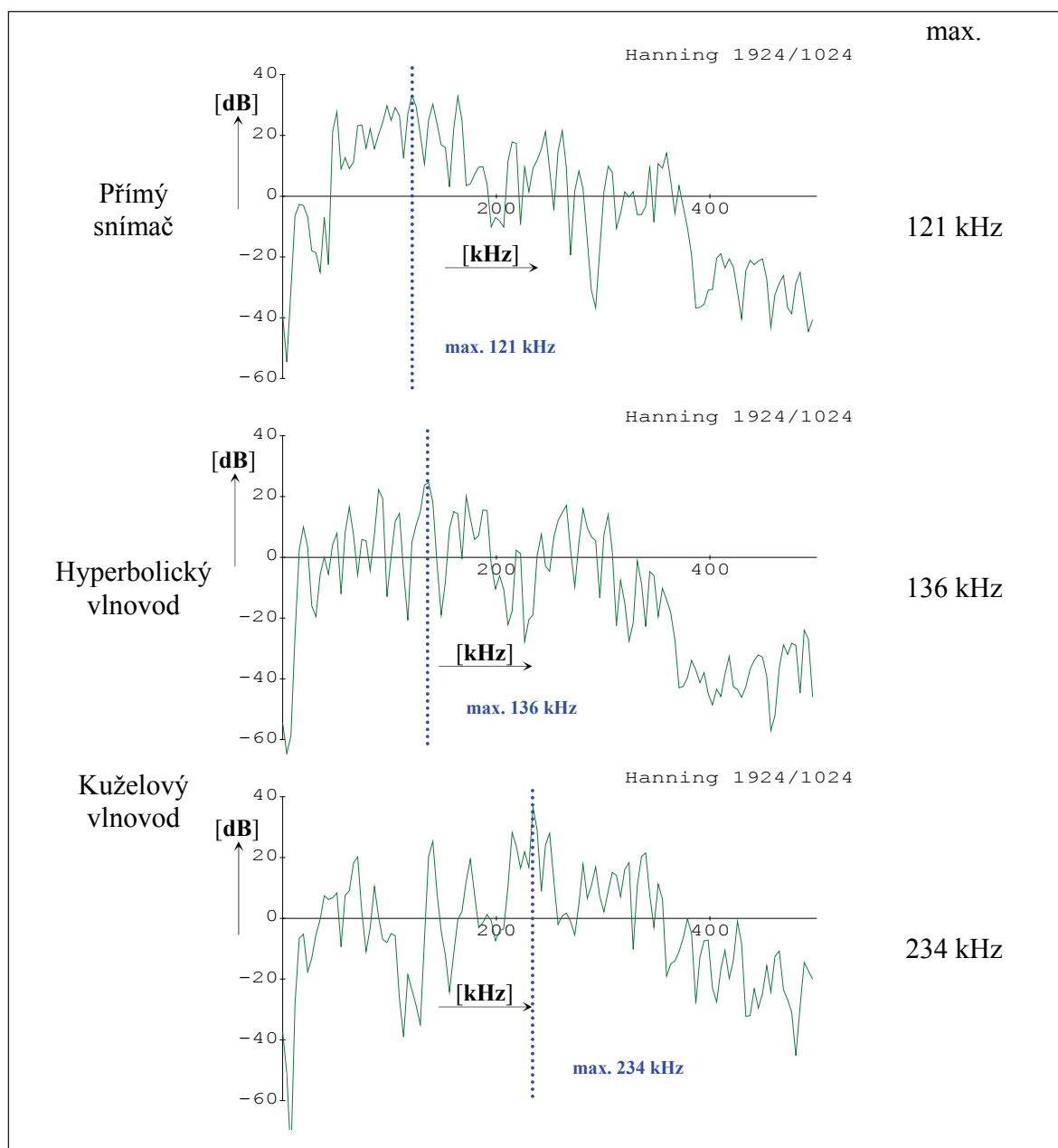
- správnou volbu průměrů konců vlnovodu, které jsou ve styku se snímači s ohledem na předpokládané typy vlnovodů i měřené objekty
- u krátkých vlnovodů (cca do 100 mm) lze konstruovat přechod průměrů vlnovodu jako kuželový z důvodu nižší výrobní náročnosti
- vlnovody s délkou nad 100 mm konstruovat s přechodovou plochou hyperbolického tvaru snižující útlum vedeného signálu.

Z porovnání naměřených výsledků je patrný vliv hodnoty  $\lambda/2$  na frekvenční průběh signálu. V případě pouhé detekce a lokalizace události AE je postačující sada vlnovodů s hrubým odstupňováním délek vlnovodů, které vychází z konstrukčního řešení přípravků na uchycení vlnovodu (držáku) společně se snímačem (v našem případě délkové odstupňování cca 25 mm). V případě potřeby podrobnějšího zkoumání signálů AE, především jejich frekvenčního rozsahu, je vhodné použít hyperbolické vlnovody i pro délky pod 100 mm a také jemněji odstupňované délky vlnovodů. Nedílnou součástí sady vlnovodů by měly být také držáky, jejichž konstrukční základ je obsažen v předchozí kapitole.

Je nutné konstrukčně dorešit:

- přítlak a rozsah tlačných pružin za účelem zvětšení možného délkového rozpětí instalovaných vlnovodů
- přesný a jednotný postup instalace vlnovodu do držáku
- instalaci snímače do držáku s ohledem na různé typy snímačů
- montáž měřicí soupravy na různé povrchy měřených objektů.

Práci lze považovat za základ pro další výzkum a vývoj různých variant sad vlnovodů pro aplikaci AE v technické praxi z hlediska provozního použití, tzn. při terénních měřeních u dálkových distribučních sítí pro různá média, tlakové nádoby, reaktory apod.



15: Srovnání průběhů transformovaného signálu snímač – vlnovody

#### SOUHRN

Práce je zaměřena na posouzení možností snímat signál akustické emise z povrchů, které jsou obtížně přístupné pro běžné snímače, případně mají vysoké teploty apod. V těchto případech se obvykle využívají tzv. vlnovody, které se připojují na citlivou část snímače, a jejich druhý konec je vhodným způsobem připevněn na povrch sledovaného tělesa. V práci je ověřen vliv délky vlnovodů a tvaru přechodu jejich průměrů na tvar a frekvenční charakteristiky snímané události AE. V závěru jsou shrnuty nejpodstatnější zásady a doporučení pro další vývoj sad vlnovodů a jejich upínacích přípravků.

Práce, uvedené v tomto článku, byly realizovány v rámci řešení projektu MPO ČR FI-IM3/136 „Výzkum nových metod měření a vyhodnocení signálů akustické emise (AE) a vývoj vícekanálové digitální aparatury s plně kontinuálním vzorkováním signálu AE a jeho předzpracováváním v reálném čase“, v programu „IMPULS“.

akustická emise, vlnovody, nedestruktivní zkoušky

## LITERATURA

- BREPTA, R., PŮST, L., TUREK, F., 1994: *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles. ISBN 80-901684-8-5.
- ČSN EN 1330 – 9 *Nedestruktivní zkoušení – Terminologie*, 2000.
- ČSN EN 13554 *Nedestruktivní zkoušení – akustické emise – všeobecné zásady*, 2002.
- KAZELLE, J., 1988: *Výrobní procesy III*. Brno: VUT.
- KOULA, V. A KOL., 2000/4: *Problematika detekce akustické emise a stimulačních parametrů*. NDT WELDING BULLETIN, 2000/4, s. 65–70, ISSN 1213-3825.
- KREIDL, M., ŠMÍD, R., 2006: *Technická diagnostika*. Praha: BEN. ISBN 80-7300-158-6.
- KŮS, M., PETŘÍK, M., 2003/3: *Plošná lokalizace zdroje akustické emise na základě statistických metod*. NDT WELDING BULLETIN, 2003/4, s. 81–85.
- OBRAZ, J., 1989: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha: SNTL. ISBN 80-03-00097-1.
- PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P., 2004: *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. Brno: VUT. ISBN 80-214-2802-3.
- PŘIBÁŇ, M., 1995: *Princip nasazení metody AE na silnostěnných nádobách*. Disertační práce, ZČU Plzeň.
- TŮMA, J. A KOL., 1997: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha, Sdělovací technika, ISBN 80-901936-1-7.
- WEBER, Z., 1996: *Akustická emise '96 – Sborník*, VUT Brno, ISBN 80-214-1883-4.
- ZYKOVÁ, L., 2004: *Odlišení stadií únavového poškození z pohledu materiálové odezvy*. Diplomová práce, MZLU Brno.

## Adresa

Doc. Ing. Michal Černý, CSc., Doc. Ing. Josef Filípek, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Doc. Ing. Pavel Mazal, CSc., Ústav konstruování, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika

