

VYUŽITÍ VÝPOČETNÍHO SYSTÉMU MATLAB PŘI NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ A DÍLCŮ ROZBOREM AKUSTICKÉ ODEZVY GENEROVANÉ MECHANICKÝM IMPULSEM

Jaroslav Smutný, Luboš Pazdera

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav železničních konstrukcí a staveb a Ústav fyziky

Abstrakt

Příspěvek se zabývá měřením a analýzou akustické odezvy, která se využívá při kontrole kvality stavebních materiálů a dílců.

K měření a hodnocení akustické odezvy byla navržena komplexní metodika, která zahrnuje postupy obsahující současné moderní trendy v oblasti zpracování měřených dat. K analýze signálů byly použity programové prostředky systému Matlab včetně Toolboxů.

1. Úvod do problematiky

Již mnohokrát jsme se mohli přesvědčit o tom, že využití zkušeností a znalostí pocházejících i z dávné minulosti přineslo překvapivě dobré výsledky. Jednou takovou zkušeností je znalost jevu, že zvuk vybuzený rázem na předmět s trhlinou (poruchou) se značně liší od zvuku stejného předmětu bez trhliny. Znalost tohoto jevu je velmi stará. Již ve středověku se tohoto jevu využívalo ke zjišťování prasklin v nádobách po jejich vypálení. Uvedený jev umožňuje rovněž detekovat trhliny v kovových materiálech. Všeobecně je známa velmi stará aplikace tohoto jevu v železniční dopravě. Při rozvoji a aplikaci metod k detekci poruch ve stavebních dílcích a materiálech je tento jev často opomíjen. Bylo to donedávna hlavně proto, že chyběla vyspělá měřicí technika a příslušný matematický aparát, nutný k hodnocení měřených signálů.

Teprve metody časově frekvenční analýzy ve spolupráci s klasickou spektrální analýzou umožňují důkladnější analýzu měřených signálů s dobrými možnostmi klasifikace a identifikace poruch. Zvuk vznikající při rázu na testovanou konstrukci či součástku, je totiž jev velmi zajímavý zejména tím, že obsahuje celou řadu vzájemně nezávislých a dobře rozlišitelných příznaků, podle kterých lze rozlišit materiál s trhlinou a bez ní.

2. Metodika měření a analýzy

Příznaky, podle kterých se určuje materiál s vadou a bez vady, jsou obsaženy zejména v časově frekvenčních spektrech měřených akustických (zvukových) signálů. Složení spektra zvuku každého materiálu je dáno několika charakteristickými kmitočty s vlastními postranními složkami v časově frekvenční rovině. Spektrum měřeného zvuku se také mění s časem v průběhu celého děje. Příznaky trhlín jsou následující:

- Změny velikosti amplitud jednotlivých charakteristických frekvencí
- Posuny charakteristických frekvenčních složek po frekvenční ose
- Existence nových frekvenčních komponent
- Existence širšího modifikovaného spektra než v případě dobrého výrobku

Další text se zabývá determinací kvality stavebních dílců (v našem případě hurdišek) metodou rozboru akustické odezvy. Základem použité metody je analýza odezvy zvukového signálu na mechanický impuls zejména časově frekvenčními postupy. Měřený vzorek byl umístěn ve speciálním přípravku na podpěrách. Mechanický impuls byl vybuzen speciálním kyvadlem s definovanou volbou intenzity úderu. Měřicí aparatura (Bruel&Kjaer) sestávala z mikrofону, hlukoměru a speciálního měřicího magnetofonu. Vzorkovací frekvence byla zvolena 44,1 kHz. Výsledkem měření byl nasnímaný a digitálně zaznamenaný elektrický signál úměrný amplitudě akustického tlaku v místě polohy mikrofону. Po provedeném rozboru, realizovaných kontrolních měřeních a výpočtech, bylo použito k analýze odezvy na mechanický ráz následujících metod a parametrů:

1. hladiny impulsního hluku L_{pk} - maximální hodnota akustického tlaku detekovaná v měřeném intervalu
2. časového zobrazení průběhu okamžité hodnoty akustického tlaku
3. frekvenční analýzy s využitím průběhu spektrální výkonové hustoty (pro přechod z časové do frekvenční oblasti byl použit algoritmus rychlé Fourierovy transformace)
4. lineárních časově frekvenčních metod spektrální analýzy (pro přechod z časové do časově frekvenční oblasti byly použity z důvodů otestování vhodnosti jednotlivých metod algoritmy Krátkodobé Fourierovy transformace a transformace Wavelet)

K analýze byly použity obrázky, které jsou tvořeny trojicí grafů. V horním grafu je zobrazen časový průběh změny akustického tlaku. V levém grafu je zobrazena spektrální výkonová hustota akustické odezvy v závislosti na frekvenci, vypočítaná přímou aplikací Fourierovy transformace na naměřený signál. V prostředním grafu je 3D zobrazení časově frekvenčního průběhu amplitudového spektra akustického tlaku. Spektra u jednotlivých grafů obr. 3 až 6 byla postupně vypočtena pomocí Krátkodobé Fourierovy transformace a transformace Wavelet. Hodnoty akustického tlaku v decibelové stupnici jsou znázorněny u prostředních grafů odlišnými barvami. Poznamenejme, že maximální hodnota je barvy černé. Na obr. 3 až 6 jsou uvedeny trojice grafů pro zpracování signálu získaného při použití metody impact-echo a to pro výrobek s vadami a bez vad. Porovnáním časového průběhu u dobrého a vadného vzorku lze usuzovat, že signál z dobrého vzorku má nižší útlum - vzorek déle zní. Frekvenční charakteristika pak ukazuje, že u vzorku s vadami se význačné frekvenční složky "posunuly" směrem k nižším frekvenčním hodnotám a že spektrum je širší, než u vzorku bez vad. Z porovnání průběhu časově-frekvenční transformace jsou jasně zřetelné odlišné charakteristiky spekter pro vzorek s vadami a bez vad.

3. Teoretický úvod do analýzy měřených signálů

Pro určení časové lokalizace frekvenčních komponent nelze použít klasický postup frekvenční analýzy, ale je nutné využít jiný transformační postup, případně jinou výpočetní metodu. Jedním z možných postupů, jak analyzovat časový výskyt frekvenčních složek

přechodových a nestacionárních signálů, je použití Krátkodobé Fourierovy transformace (STFT). Tato lokalizuje frekvenční složky v čase s konstantním (lineárním) rozlišením. Základním principem je rozdělení signálu na dostatečně malé realizace, u nichž je možno předpokládat dostatečnou stacionaritu (ergodicitu). To je provedeno multiplikací jisté okénkové funkce a signálu. Na každém takovém výřezu je provedena Fourierova transformace (FT). Okénko se posouvá v čase. STFT poskytuje kompromis mezi časovou a frekvenční reprezentací signálů. Její definiční integrál je

$$STFT(t', f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) \cdot g^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi f(t-t')} \cdot dt, \quad (1)$$

kde g je okénková funkce, '*' komplexní konjunkce, t' časové posunutí okénka, $x(t)$ je časová reprezentace signálu a $STFT(t', f)$ je jeho časově-frekvenční reprezentace.

Protože STFT je počítána Fourierovou transformací okénkem upraveného signálu, je při prezentaci výsledků často používán přepočítání na amplitudové spektrum, spektrální výkon nebo spektrální výkonovou hustotu. Je nutno podotknout, že je často vhodné časově frekvenční zobrazení spektra doplnit o případné frekvenční a časové řezy.

Moderní a v poslední době rychle se rozšiřující metodou řešící problémy rozlišení v časové, frekvenční a časově-frekvenční doméně je transformace Wavelet. Transformace Wavelet (dále WT) je relativně novou metodou vhodnou pro analýzu zejména stacionárních, ale i nestacionárních a rychle se měnících signálů. Byla vyvinuta koncem osmdesátých let.

Obdobně jako STFT, také WT lokalizuje výskyt frekvenčních složek u nestacionárních signálů v čase. WT poskytuje tzv. analýzu signálu s vícenásobným rozlišením, která se provádí aplikací postupně rozšiřované okénkové funkce. Pro analýzu vysokých frekvencí se používá úzké okno a naopak pro analýzu nízkých frekvencí okno široké. Signál je při této transformaci rozložen do sady jistých funkcí (zvaných waveletů). Pojem "wavelet" označuje "malou vlnku". Základní funkcí transformace je tzv. mateční wavelet. Další funkce jsou odvozovány z matečního waveletu jeho postupným rozšiřováním a posunem v čase. Po aplikaci transformace Wavelet může být původní signál rekonstruován inverzní transformací Wavelet.

Spojité transformace Wavelet je definována integrální rovnicí

$$WT(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) \cdot dt \quad (2)$$

kde τ je časové posunutí, s je měřítko, Ψ je transformační funkce, která se nazývá základní nebo-li mateční wavelet, $x(t)$ je analyzovaný signál a $WT(\tau, s)$ je transformace Wavelet.

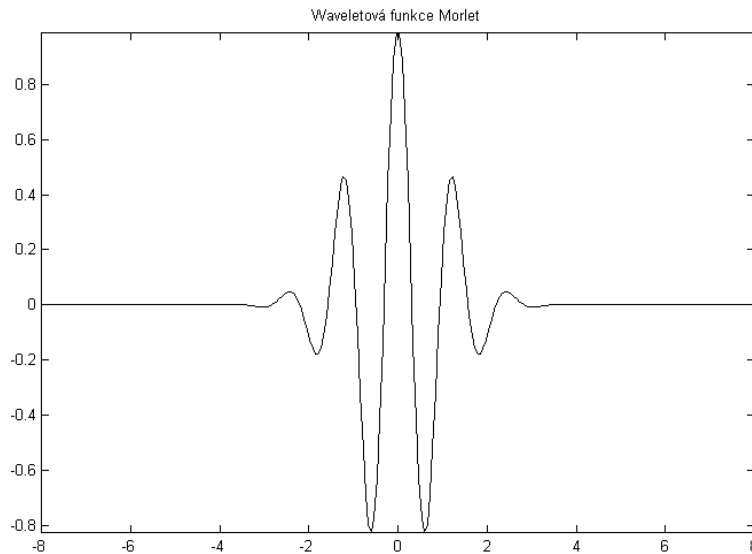
Pojem časové posunutí τ je použit ve stejném významu jako u STFT. Jedná se o relativní posun waveletu k signálu. Parametr zvaný měřítko s je v transformaci Wavelet srovnatelný s pojmem měřítko v kartografii. Vysoká měřítka korespondují s globálním pohledem, malá měřítka pak poskytují detailnější pohled. Obdobně nízké frekvence (vysoká měřítka) korespondují s globální informací o signálu, zatímco vysoké frekvence (nízká měřítka) korespondují s detailní informací o signálu.

Výpočet spojitě transformace Wavelet lze zjednodušeně popsat v několika základních krocích:

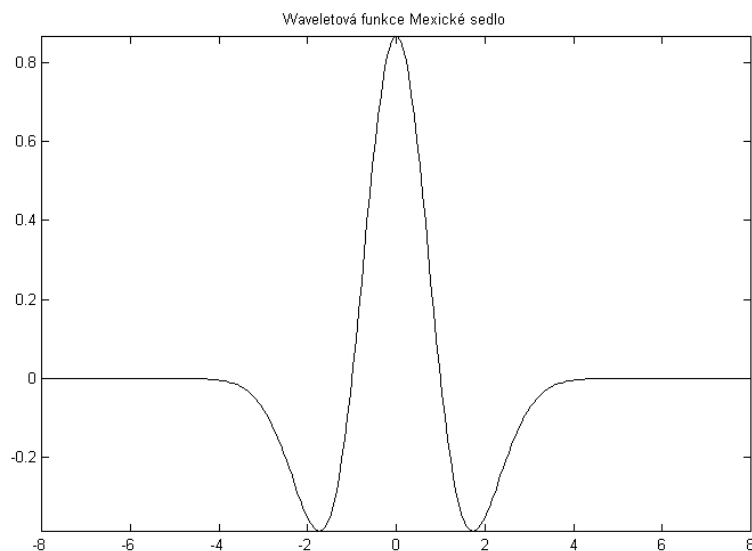
1. Vybere se vhodný wavelet a nastaví se jako mateční.

2. Wavelet se porovná s analyzovaným signálem. Vypočítá se koeficient waveletu (koeficient shody). Čím je koeficient větší, tím je větší shoda waveletu (při daném posunutí a měřítku) se signálem.
3. Wavelet se posune vzhledem k signálu (časové posunutí) a opakuje se krok 2. Krok 3 se provádí pro všechna časová posunutí.
4. Změní se měřítko waveletu (realizuje se roztažení waveletu) a opakují se kroky 2 a 3. Opakování se provádí pro všechna měřítka.

Koeficienty transformace Wavelet se přitom počítají obvykle pro všechny celočíselné hodnoty (obecně nemusí být celočíselné) měřítka a polohy.



Obr. 1 mateční Wavelet typu Morlet



Obr. 2 mateční Wavelet typu Mexické sedlo

Často používanými matečnými funkcemi spojitě transformace Wavelet jsou wavelet typu Morlet (obr. 1) a Mexický klobouk (někdy také nazývaný Mexické sedlo) (obr. 2). Pravděpodobným důvodem je skutečnost, že jejich tvar je blízký sinusovým vlnám. Wavelet typu Morlet je definován jako součin Fourierovy základní báze a Gaussovy pravděpodobnostní funkce dle vztahu

$$\Psi(t) = e^{-j\omega_0 t} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (3)$$

Wavelet typu Mexické sedlo je definován jako druhá derivace Gaussovy pravděpodobnostní funkce. Po následné úpravě dojdeme ke vztahu

$$\Psi(t) = (1 - t^2) \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (4)$$

Spojitá transformace Wavelet je reversibilní transformace. To znamená, že rekonstrukci signálu $x(t)$ je možné realizovat tzv. zpětnou (inversní) transformací.

4. Zhodnocení výsledků

K hodnocení naměřených signálů byl využit program Matlab s knihovnamí Signal Processing, Wavelet. Součástí těchto knihoven jsou jak časové a frekvenční (Fourierovy transformace a její modifikace), tak i časově frekvenční postupy (zejména Krátkodobá Fourierova transformace a transformace Wavelet).

V tomto programovém prostředí byl vytvořen komplexní programový systém k realizaci měření a následnému zpracování naměřených dat. Použité knihovní funkce byly náležitě upraveny a optimalizovány pro potřeby akustických měření a analýz.

V dalším textu se budeme zabývat pouze grafem časově-frekvenčních průběhů získaných rozličnými matematickými postupy. Jako základní transformaci budeme považovat Krátkodobou Fourierovu transformaci. Časově frekvenční průběh u výrobku bez vad (obr. 4) ukazuje význačně dvě frekvenční složky na frekvencích 2,5 kHz a 3,3 kHz. Složka na frekvenci 2,5 kHz je utlumena o 20 dB přibližně za 30 ms, kdežto frekvenční složka 3,3 kHz je utlumena za 50 ms. Tyto dvě frekvenční složky jsou ve spektru oproti ostatním frekvenčním složkám význačné. Změna časově-frekvenčního spektra u vzorku s vadami (obr. 3) je lehce pozorovatelná. Význačná frekvenční oblast přibližně od 700 Hz do 3,2 kHz obsahuje více než dvě význačné frekvenční složky - lze vybrat např. hodnoty na 700 Hz, 1,1 kHz, 1,8 kHz, 2,2 kHz, 2,5 kHz, 2,8 kHz, 3,2 kHz - jejich hodnoty jsou o méně jak jeden řád nižší než hodnota maximální složky. Útlumy těchto frekvenčních složek o 20 dB jsou obvykle větší než u vybraných složek u vzorku bez vad. Dosahují hodnot útlumu přibližně mezi 15 ms a 30 ms.

Časově-frekvenční průběhy vypočtené transformací Wavelet, jejíž mateřským Waveletem byl typ Morlet (obr. 1), u signálů získaných u vzorku s vadou (obr. 5) a bez vady (obr. 6) ukazují obdobný charakter jako u průběhů vypočtených Krátkodobou Fourierovou transformací, avšak spektra jsou "rozmazanější". Je to způsobeno vlivem Heisenbergova principu, kdy vyšší frekvenční složky jsou lépe lokalizovány časově než frekvenčně a naopak. Navíc z časově-frekvenčního spektra vytvořeného pomocí transformace Wavelet je možné rozlišit jednotlivé shluky odpovídající časovému průběhu.

5. Závěry vyplývající z měření a analýz

Závěrem lze konstatovat, že z naměřených hodnot a z uvedených grafů vyplývají možnosti využití programového systému Matlab resp. jeho Toolboxů i pro použití v praktických aplikacích.

Na základě provedených měření a analýz lze konstatovat, že použitá metodika laboratorních měření a analýz poskytuje dobré výsledky a závěry. Měřené i vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Lze rovněž konstatovat, že ke kvalitnímu zpracování provedených měření výrazně přispěly moderní prostředky signálové analýzy, zejména pak Krátkodobá Fourierova transformace a transformace Wavelet. Tyto metody poskytují časovou lokalizaci frekvenčních komponent obsažených v měřeném signálu (hladina akustického tlaku, zrychlení).

Analýza signálů získaných při měření a analýze odezvy na mechanický ráz poskytuje nový detailnější pohled na přechodové a nestacionární charakteristiky pro vyhodnocení testovaných stavebních dílců a konstrukcí.

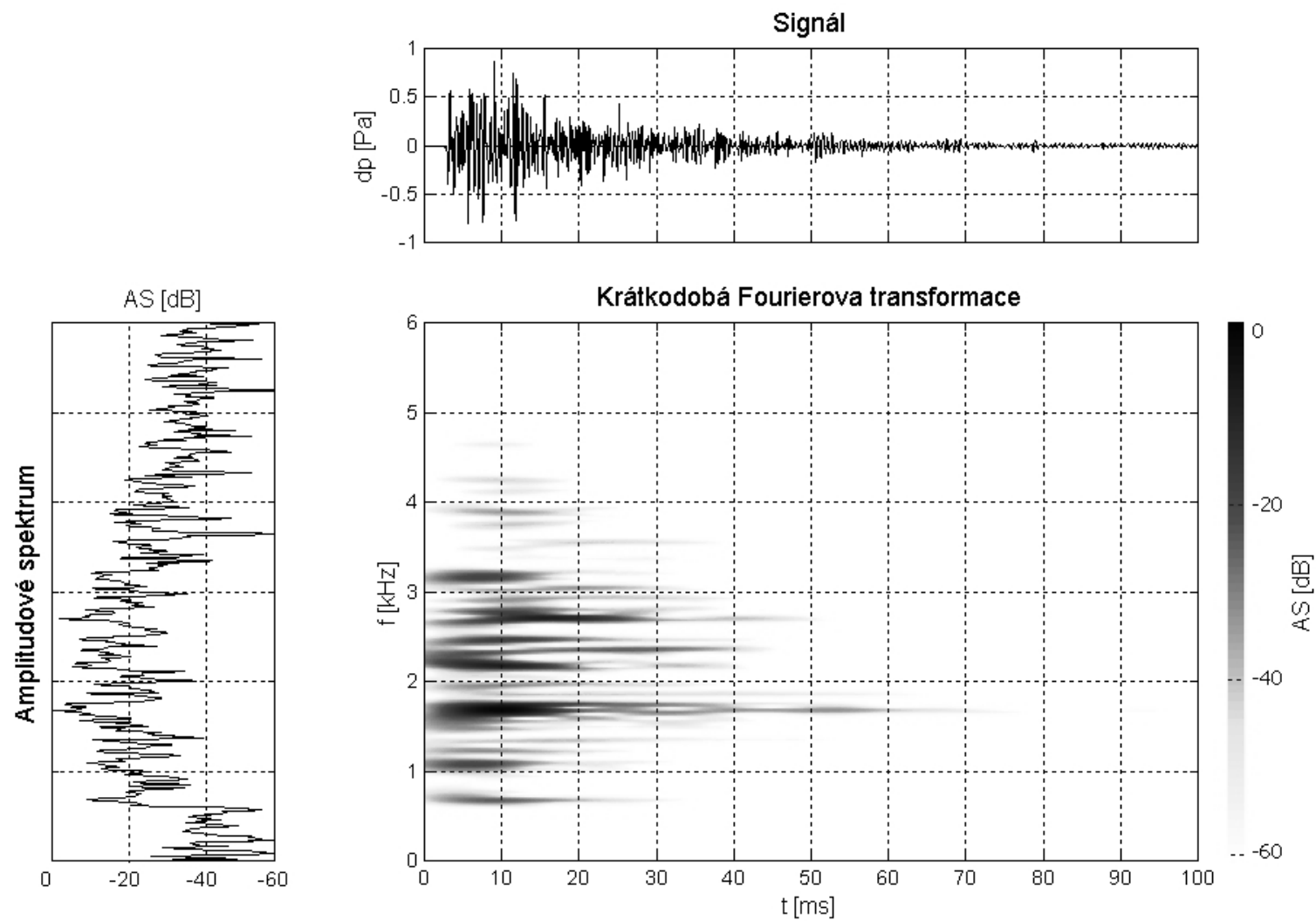
K analýze měřených signálů bylo s výhodou využito velmi flexibilního prostředí programového produktu Matlab, resp. jeho knihovnicí funkcí. Je zřejmé, že tento systém je možné použít nejen pro teoretické výpočty, ale i pro analýzy reálně změřených veličin.

Použitá literatura

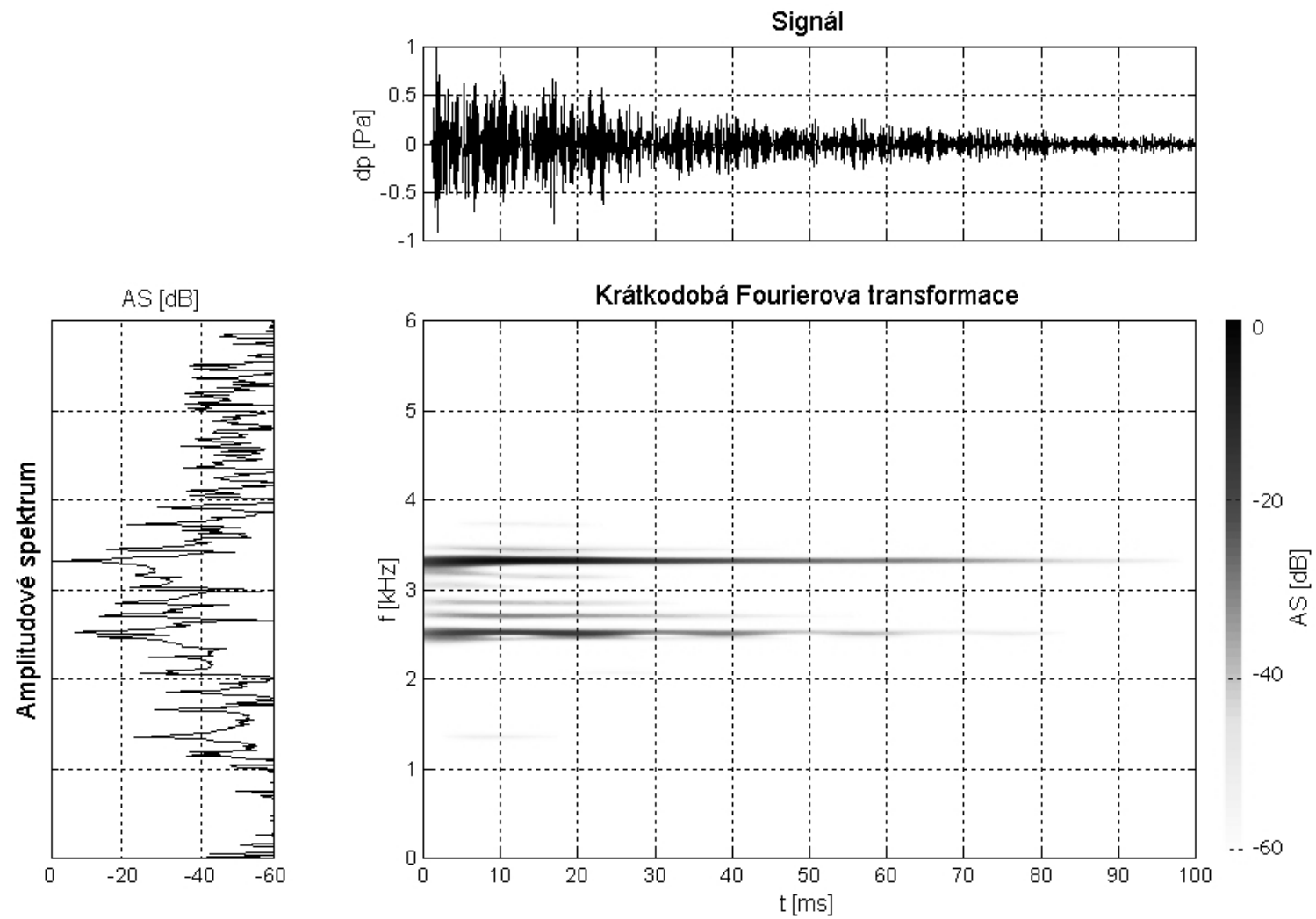
- [1] Firemní dokumentace k programu Matlab
- [2] Pazdera L., Smutný J.: Acoustic Testing of Building Sections – Brick Hourdis, XI. Mezinárodní vědecká konference - sekce č. 8 stavebně materiálové inženýrství, VUT Fakulta stavební Brno, Česká republika, str. 149-152, , 1999, ISBN 80-214-1438-3
- [3] Smutný J., Pazdera L.: Analyses of Acoustic Emission Signal by Short Time Fourier Transform With Application on Thin-Wall Ceramic Building Materials, DIAGO 2000 technická diagnostika strojů a výrobních zařízení - mezinárodní konference, Ostrava, pp. 120-126, 2000, ISBN 80-7078-749-X
- [4] Pazdera L., Smutný J.: Analysis of Stochastic Signals by Bartlett Method, Physical properties of materials, proceedings of international workshop, Bratislava, Slovak Republic, 9/2000, ISBN 80-227-1364-3, pp. 65-66

Poděkování

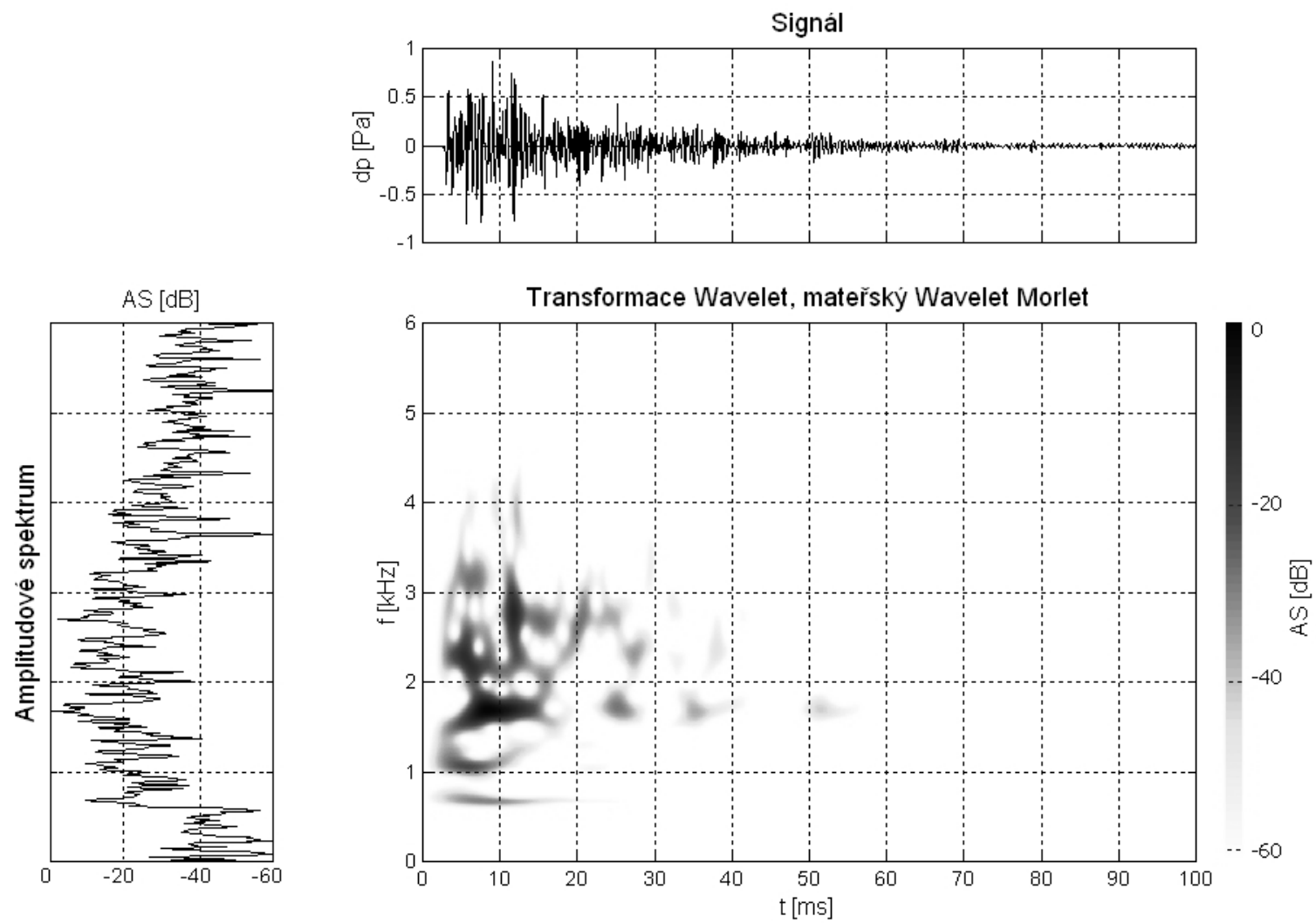
Příspěvek byl vypracován za podpory výzkumných záměrů MŠMT registrační číslo **CEZ:J22/98:261100007** "Teorie, spolehlivost a mechanismus porušování staticky a dynamicky namáhaných stavebních konstrukcí" a **CEZ J22/98:261100009** "Netradiční metody studia komplexních a neurčitých systémů".



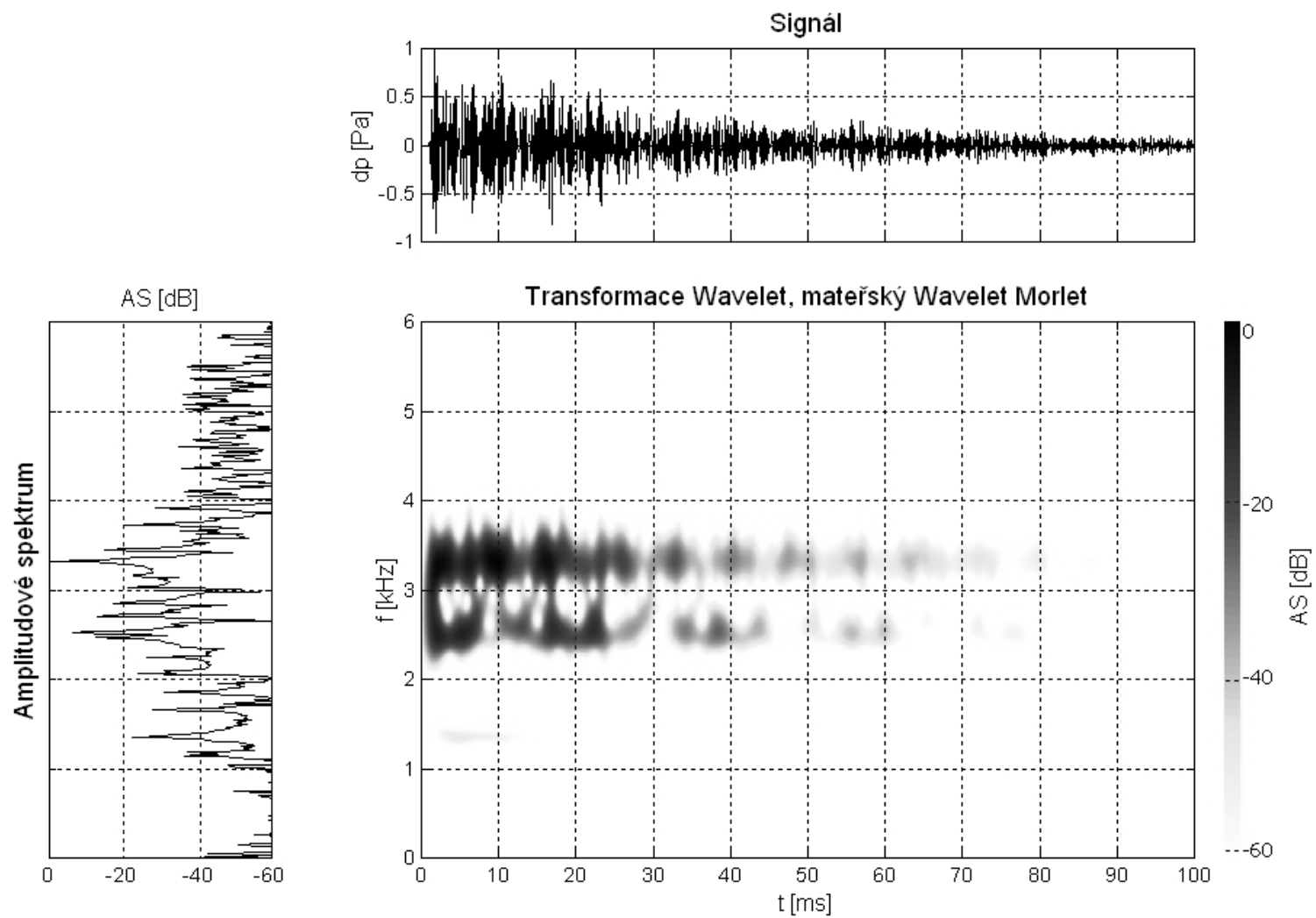
Obr. 3 Výrobek s vadami - časový průběh signálu z mikrofону, frekvenční spektrum a časově frekvenční analýza Krátkodobou Fourierovou transformací



Obr.4 Výrobek bez vad - časový průběh signálu z mikrofonu, frekvenční spektrum a časově frekvenční analýza Krátkodobou Fourierovou transformací



Obr. 5 Výrobek s vadami - časový průběh signálu z mikrofonu, frekvenční spektrum a časově frekvenční analýza transformací Wavelet



Obr. 6 Výrobek bez vad - časový průběh signálu z mikrofonu, frekvenční spektrum a časově frekvenční analýza transformací Wavelet