

ANALÝZA ŠIROKOPÁSMOVÉHO SNÍMAČE NAPĚŤOVÝCH VLN.

THE ANALYSIS OF THE BROADBAND TRANSDUCER OF STRAIN WAVES

Štefan Morávka¹

Abstract:

The paper presents the detailed analysis of the piezoelectric non-resonance broadband transducer of strain waves, namely using finite element method (FEM). The analytical, numerical and experimental techniques are employed. The main aims follow:

- 1. Determining an effect of inertial mass geometry. Recommendations for the optimal design of the transducer from the frequency characteristic point of view.*
- 2. The better approximation of experimentally obtained results using the convolution of the analytical solution results (halfspace, thick plate) and the transducer's response on unit step (FEM). Comparison with the FEM results obtained via direct time integration.*
- 3. Attempt to identify of the natural frequencies of the transducer (modal analysis) in Fourier spectrum of the unit step transducer response obtained via FEM, in convolution (see point 2), and in experimental results.*

Key words: transducer, acoustic emission, acoustic waves, finite element method (FEM), cut-of-frequency, analytical solution, convolution, numerical model, experiment.

Úvod. Metody a podmínky řešení.

Cílem prezentované práce je podrobná analýza širokopásmového piezoelektrického nerezonančního snímače napětíových vln, zejména užitím metody konečných prvků (MKP). Využity jsou analytické, numerické i experimentální výsledky. Práce se sestává z těchto částí:

1. posouzení vlivu geometrie setrvačné hmoty snímače na odezvu na jednotkový skok pomocí MKP s cílem doporučit optimální tvar z hlediska frekvenční charakteristiky snímače.

2. pomocí konvoluce analytických řešení a odezvy na jednotkový skok (MKP) se přiblížit k experimentálně získaným průběhům na tlusté desce a poloprostoru. Porovnání s MKP řešením přímou integrací v čase.

3. pokus o identifikaci vlastních frekvencí snímače (z modální analýzy) ve frekvenčních spektrech MKP odezvy snímače na jednotkový skok, průběhů získaných konvolucí a experimentálních výsledků.

MKP výpočty byly prováděny MKP systémem MARC s pre- a post-procesorem MENTAT, na pracovní stanici Silicon Graphic OCTANE s procesorem R10000. Konvoluce byly počítány programem ve Fortranu a frekvenční spektra v prostředí Matlabu.

Pro porovnávání bylo použito několik dříve detailně analyticky vyřešených nestacionárních rázových úloh [1], [2]. Dále je pro měření k dispozici několik různých

¹ Dr.Ing.Štefan Morávka, ÚFY, společné pracoviště Západočeské univerzity v Plzni a Ústavu termomechaniky AVČR v Praze, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň, tel.: 019/72 36 415-6, E-mail: moravka@ufy.zcu.cz.

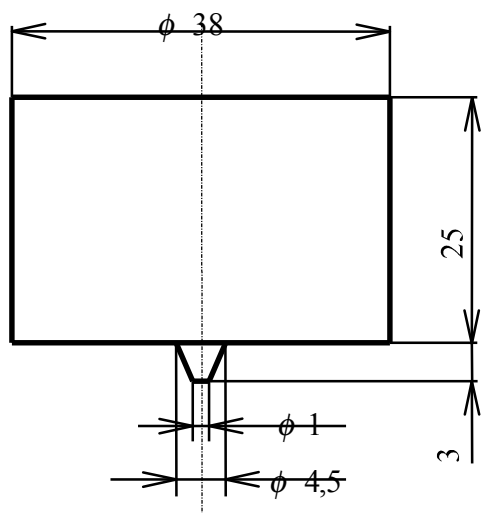
funkčních vzorků širokopásmových nerezonančních snímačů s aktivním kuželovým piezoelementem vyrobených podle [3] a dvě velká testovací tělesa (tlustá deska, poloprostor).

Nezanedbatelným předpokladem korektního přístupu k řešení je znalost dřívějších výsledků testování MKP pro nestacionární rázové jevy [4], [5] a dále zejména [6], které jsou podkladem pro serióznější představu o míře spolehlivosti MKP výsledků pro nestacionární úlohy.

Konstrukce snímače.

Snímače se skládají z aktivního piezoelektrického elementu a setrvačné hmoty. Obě části jsou spojeny elektricky vodivým lepidlem. Piezoelementy vyrobila na zakázku a.s. TERRONIC, Hradec Králové, z materiálu PK 274, viz [7]. Těleso setrvačné hmoty je vysoustruženo z mosazi.

<i>Materiálové konstanty</i>	<i>piezokeramiky</i>	<i>mosazi</i>
Hustota	7.760 kg/m ³	8.500 kg/m ³
Poissonova konstanta	0,323	0,35
Modul pružnosti	0,7·10 ¹¹ Pa	0,95·10 ¹¹ Pa
rychlost dilatační vlny	3.611 m/s	4.235 m/s



Obr.1 Schéma snímáče.

Snímače byly vyrobeny v ÚFY ZČU podle [3]. Vlevo na obrázku 1 je schéma snímáče, použitého pro experimentální měření. Na pracovišti autora je k dispozici několik variant tohoto snímáče, a to s kuželovými tělisky o horním průměru 4,5 mm a o dolním průměru 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 5,5 mm a válcové tělisko o průměru 5,0 mm. Výška je 3 mm nebo 2,5 mm. Setrvačná hmota je obvykle válec o průměru 38 mm a výšce 25 mm. Dále jsou k dispozici snímáče o výšce setrvačné hmoty 50 mm nebo o průměrech 30 a 10 mm a výšce 15 mm, o průměru 20 mm a výšce 26 mm nebo ve tvaru komolého kužele, na jehož menší podstavě je nalepena piezokeramika. Jeden snímač má piezoelement zčásti zapuštěný do setrvačné hmoty.

Dále je k dispozici experimentální typ laboratorního zapouzdrženého snímáče.

Posouzení vlivu geometrie snímáče na frekvenční charakteristiku.

Hlavním cílem analýzy snímáče je pomocí numerického experimentování posoudit vliv geometrie snímáče na průběh odezvy na jednotkový skok a nalézt snímáč, jehož odezva je co nejbližší průběhu buzení snímáče v místě měření. Hledáme tedy snímáč s co nejvyrovnanější frekvenční charakteristikou.

Numerický model.

MKP modely obsahují převážně čtyřuzlové prvky o hraně 0,25 mm (piezoelement i menší). To znamená, že nejkratší vlna, kterou je model schopen přenášet má vlnovou délku $\lambda_{\min} = 0,5$ mm. Frekvenční spektrum jednotkového skoku, kterým model budíme, není shora omezeno, takže dochází k „oříznutí“ tohoto spektra. Pro orientaci, o jakých max. frekvencích uvažujeme, uveďme, že v jednorozměrovém případě by mezní frekvence takového modelu byla cca 7 MHz. Pokud vezmeme v úvahu, že propustné pásmo zesilovače ADAM použitého při experimentech je do 10 MHz, je zřejmé, že se pohybujeme přibližně ve srovnatelných oblastech. Nicméně pro nestacionární výpočty se obvykle doporučuje volit cca 6-10 prvků na

$\lambda_{\min}$. Volba velikosti prvků je nutným kompromisem mezi požadavkem minimálního $\lambda_{\min}$ a výpočetního času. Výpočet např. snímače z obr.1 (7798 prvků, 2000 kroků do času 100 μ s) trval na pracovní stanici SGI cca 2,5 dne.

Aby bylo možno výpočet realizovat, musela být do modelu snímače zavedena některá zjednodušení oproti fyzikální skutečnosti. Zejména nebylo možno zahrnout piezoelektrický jev a respektovat tak zpětnou elektromechanickou vazbu piezokeramiky. Za přiblížení k elektrickému signálu pokládáme časový průběh celkové axiální deformace piezoelementu, kterou globálně popisujeme průměrnou hodnotou axiálního posuvu uzlů ve styčné rovině mezi piezoelementem a setrvačnou hmotou. Není tedy uvažováno postupné vybuzování elektrického signálu v průběhu deformace piezoelementu. Toto zjednodušení ale nelze přeceňovat, protože dilatační vlna projde piezoelement za pouhých 0,8 μ s.

Model snímače je rotačně symetrické, homogenní, lineárně elastické těleso. Použity jsou čtyřuzlové rotačně symetrické izoparametrické prvky. Řešení je prováděno Newmarkovou integrací s koeficienty $\beta = 0,5$ a $\gamma = 0,25$. Materiálové konstanty modelu odpovídají skutečnému snímači (viz výše).

Skokové buzení je modelováno okrajovou podmínkou posuvu snímací plošky piezoelementu ($\phi 1$ mm, obr.1) v axiálním směru o 0,005 mm. To je cca 1/10 velikosti konečných prvků v tomto místě.

Kuželové piezokeramické tělísko (198 prvků) je u všech zde uváděných typů snímače stejné. Setrvačná hmota je dle typu snímače modelována 900 až 12658 prvků.

U některých snímačů se počítá odezva do času 100 μ s po 0,05 μ s (2.000 kroků), u ostatních do 50 μ s s krokem 0,1 μ s (500 kroků). Dilatační vlna projde v axiálním směru např. tělesem setrvačné hmoty použitého válcového snímače za 100 μ s přibližně 8 krát.

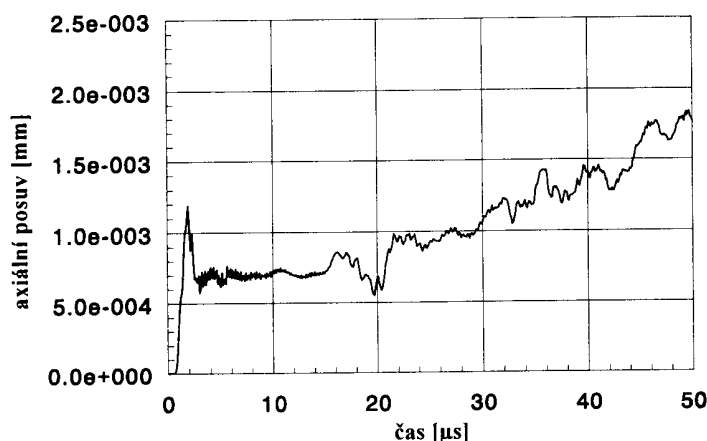
Vliv geometrie setrvačné hmoty.

Byly počítány odezvy celkem 13 modelů snímače. Různou modifikací tvaru setrvačné hmoty se pokoušíme zhodnotit vliv její velikosti (*změnou průměru a výšky*), dále studujeme vliv tvaru této hmoty (*zejména zakřivení nebo kuželovitosti původně rovinné horní odrazové plochy, zkoumají se důsledky kuželovitosti (sbíhání i rozbíhání) původně válcové setrvačné hmoty*) a testujeme i dva případy kulové setrvačné hmoty.

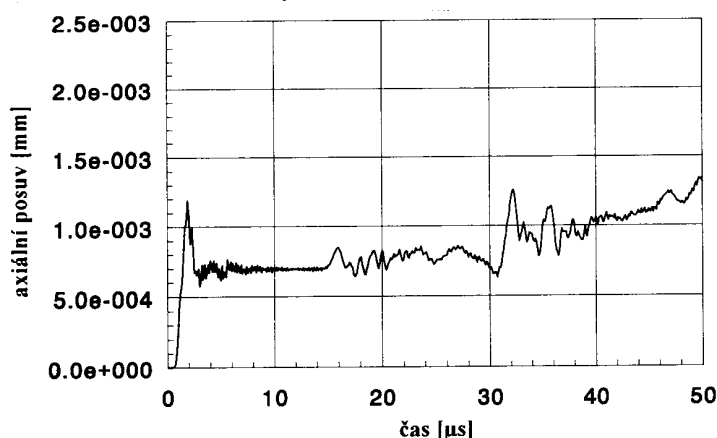
Průběhy odezev všech uvedených modelů na jednotkový skok byly vzájemně porovnávány. Křivka vždy z nuly vytvoří krátký zákmit (špičku) a pak až do příchodu první odražené dilatační vlny setrvává téměř na konstantní hodnotě. Dále se průběhy už odlišují. Pro ilustraci je na obr.2 uvedena odezva snímače s válcovou setrvačnou hmotou s kulovým zakončením (příchod odražené dilat.vlny: 8,97e-6 sec. od válce a 14,81e-6 sec. od kulové plochy) a na obr. 3 odezva snímače s půlkulovou setrvačnou hmotou (odražená dilatační vlna od kulové plochy 14,81e-6 sec). MKP modely sítí snímačů budou ukázány na konferenci.

Nejprve se s cílem zjistit vliv rozměrů porovnávaly dva válcové snímače o shodném poloměru 19 mm, první s výškou 25 mm a druhý s poloviční výškou 12,5 mm. U prvního dorazí k piezoelementu nejprve odraz čela dilat.vlny od válcové plochy (8,97e-6 sec.), u druhého nejprve od protější volné rovinné plochy (5,90e-6 sec.). Lze vypořadovat, že *k růstu průběhu dochází až po příchodu odrazu od rovinné plochy*, dříve tedy u nižšího snímače.

Pro potvrzení této domněnky byla vypočtena odezva snímače s výškou rovnou dvojnásobku poloměru ($h = 38$ mm). Odraz dilatační vlny od protější rovinné plochy dorazí k piezoelementu (17,94e-6 sec.) přibližně stejně jako odraz smykové vlny od válcové plochy (19,67e-6 sec.). Skutečně, k výraznějšímu odchýlení dochází až v tomto čase.



Obr.2 Příklad odezvy válcového snímače.



Obr.3 Příklad odezvy kulového snímače

Vypuklá část má střed křivosti záměrně uprostřed slepení piezokeramiky a setrvačné hmoty. Akustické vlny šířící se (zjednodušeně) z tohoto bodu se po odrazu od kulové plochy vracejí naráz zpět. Do příchodu prvního odrazu čela dilatační vlny ($8,97 \cdot 10^{-6}$ sec.) jsou průběhy shodné. Pak průběh válcového snímače zůstává krátce téměř konstantní, ale od času $15 \cdot 10^{-6}$ sec. se již vlní. Odezva půlkulového snímače se po příchodu odrazu sice drobně rozechvěje, ale proti očekávání průběh nevykazuje větší rozkmitání až cca do $20 \cdot 10^{-6}$ sec. Tento výsledek je příznivější, přestože hmotnost kulového tělesa je podstatně menší!

Protože odraz čela dilatační vlny od kulové plochy průběh výrazněji nerozkmital, bylo by se možno domnívat, že kulová odrazová plocha účinně eliminuje důsledky odrazu vln (viz také např. odezva snímače s kulovou setrvačnou hmotou na obr.3). Je to neočekávané, protože střed kulové plochy (místo koncentrace účinku odražených vln) je v místě slepení piezokeramiky se setrvačnou hmotou, kde výchylky snímáme!

Byla proto učiněna další zkouška s kulovou plochou, kdy válcový snímač o průměru 19 mm a výšce 25 mm byl zakončen kulovým vrchlíkem opět se středem v místě slepení. Průběh po příchodu odrazu dilatační vlny od kulové plochy sice nevykazuje drobné rozkmitání jako u polokoule, ale relativně hladký průběh trvá jen do cca $15 \cdot 10^{-6}$ sec, oproti cca $20 \cdot 10^{-6}$ sec. u polokoule. Dochází k přiblížení k odezvě válcového snímače, z nějž modifikace vycházela.

Dále byl učiněn pokus s kulovou plochou vydutou, kde by bylo možno očekávat zlepšení v důsledku rozptylu vlnových čel odrazem od této plochy. Ke zlepšení nedošlo, dokonce po příchodu odrazu čela dilatační vlny od kulové plochy dochází k poněkud většímu rozvlnění křivky než u kulového zakončení vypuklého.

Mohli bychom se tedy domnívat, že odraz od válcové plochy se v odezvě na jednotkový skok příliš neprojevuje. Proto byla spočtena odezva snímače 1 o stejné výšce $h = 25$ mm, ale o poloměru jen 2,25 mm. Domněnka zde zcela selhala. Průběh odezvy jednotkový skok ani vzdáleně nepřipomíná, není patrná již zmíněná plochá oblast zhruba konstantního posuvu. Průběh trvale roste a příchodem odrazu čela dilatační vlny od horní rovinné plochy se jeho růst ještě zrychlí. Tento snímač se nejeví vhodný k měření posuvů v diagnostice nestacionárních vlnových jevů (jako je akustická emise). Kromě oddálení příchodu odrazu dilatační vlny od protější rovinné plochy je tedy potřeba soustředit setrvačnou hmotu v blízkosti aktivního piezoelementu.

Proto byl proveden výpočet dvou snímačů; válec o shodném průměru i výšce 19 mm a půlkulový snímač s poloměrem také 19 mm.

Byly ještě provedeny výpočty odezev dvou snímačů, kde místo kulových ploch (vypuklé a vyduté) je zakončení kuželovitě. Výsledné průběhy se téměř shodují s kulovými snímači. *Nyní je již zřejmé, že účinky kulových ploch (koncentrace odrazu nebo rozptyl) se neprojevují tak jednoznačně, jak by se dalo odhadem očekávat. Výrazné zlepšení, tj. průběh téměř konstantní až do příchodu čela odražené smykové vlny vykazuje pouze snímač půlkulový.*

Poslední numerický experiment byl proveden na dvou modelech, kde byla ponechána stejná výška 25 mm i rovinná horní odrazová plocha, ale původně válcový snímač byl mírně zešíkmen do kužele sbíhavého nebo rozbíhavého. *Výsledky potvrzují již výše uvedené doporučení o potřebě co největšího soustředění hmoty v blízkosti piezoelementu. Zatímco odezva snímače sbíhavého (širší u piezokeramiky) se velmi málo liší od odezvy snímače válcového (přesto, že je celkově lehčí), pak odezva stejně hmotného snímače rozbíhavého (užší u piezokeramiky) je vyrovnaná podstatně kratší dobu. Vychýlení patrně přináší odraz čela smykové vlny od blízké kuželové plochy.*

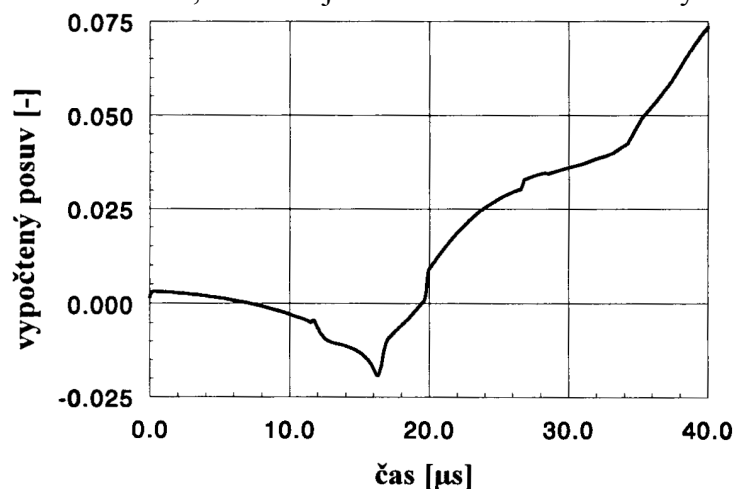
Ze znalosti odezev na buzení jednotkovým skokem snímačů odvozených od základního tvaru válcového snímače je lze konstatovat, že *dílčí úpravy tvaru původně válcové setrvačné hmoty, zejména úpravy tvaru samotného zakončení nejsou v odezvě snímače natolik dominantní, jak se původně předpokládalo. Dokonce ani odraz od kulové plochy se středem v místě přilepení piezoelementu není výrazný. Kulová plocha vydutá, kde se předpokládalo zlepšení vlivem rozptylu vln, výsledek dokonce zhoršuje. Pokud chceme co nejdéle zachovat přibližně konstantní hodnotu odezvy snímače na jednotkový skok, platí obecně, že je nutno co nejvíce soustředit hmotu v okolí aktivního piezoelementu. Pouhé zvyšování hmotnosti např. průměrem setrvačné hmoty je zbytečné, protože průběh je znehodnocen již příchodem odrazu od bližšího protějšího čela (nebo naopak). Optimální z hlediska celkové hmotnosti a vlnových účinků tvaru se jeví tvar půlkulový se středem v místě slepení. Odezva je blízká konstantní odezvě i po příchodu odrazu čela dilatační vlny. Teprve až čelo odražené smykové vlny přináší rozkmitání.*

Porovnání konvoluce odezvy na jednotkový skok a anal.řešení s experimentem

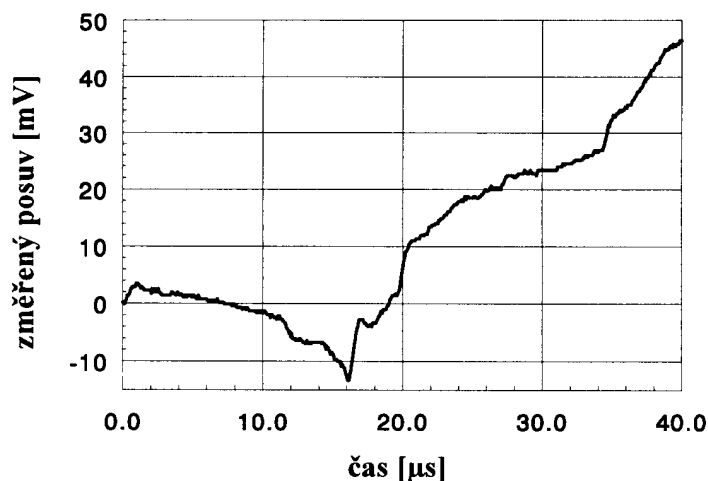
Pro měření posuvů při nestacionárních vlnových jevech potřebujeme snímač s širokým frekvenčním pásmem (řádově MHz) a s co nejvyrovnanější frekvenční charakteristikou. Uvedené testování pomocí odezvy na jednotkový skok ukazuje, do jaké míry (a do jakého času) se odezva shoduje s buzením. Při výpočtech však byla přijata řada zjednodušení (viz výše). Abychom ukázali, zda-li a do jaké míry zjednodušení znehodnocují výsledky a zda-li tedy snímače dostatečně věrně reprodukuje buzení reálným signálem, pokusili jsme se zrekonstruovat naměřené signály pomocí konvoluce odezvy snímače na jednotkový skok vypočtené MKP s exaktními analyticky vypočtenými průběhy nestacionární napjatosti [1], [2]. Ty pak porovnáme se změřenými průběhy [9].

Měření se prováděla na tlusté desce a na poloprostoru. Buzení bodovým skokovým odlehčením bylo realizováno rozdrčením křemenné mikrokapiláry (vnější průměr 200 μm). Použit byl snímač s válcovou setrvačnou hmotou o poloměru 19 mm a výšce 25 mm.

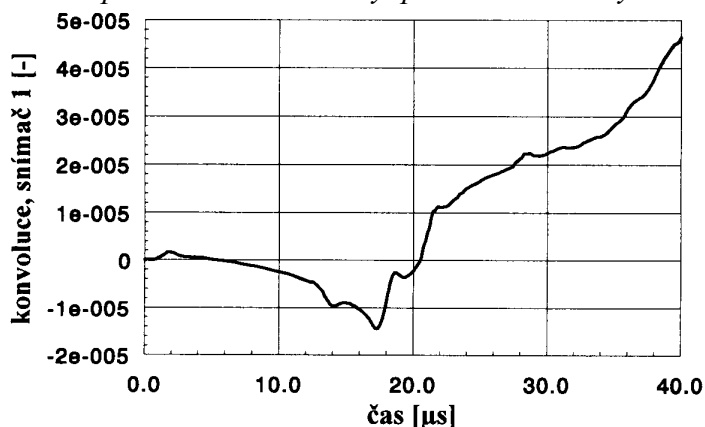
Zde uvedme příklad průběhů z tlusté desky (5 cm), kdy snímací místo je na opačném povrchu než budící zdroj v kolmé vzdálenosti 5 cm od zdroje. První obrázek (obr.4) uvádí průběh posuvu kolmého k povrchu desky vypočtený analyticky. Velikost posuvu je bezrozměrová, měřítko je vztaženo k rázu elastických poloprostorů. Absolutní hodnoty nás



Obr.4 Analyticky vypočtený posuv tlusté desky



Obr.5 Experimentálně změřený posuv tlusté desky



Obr.6 Konvoluce analyticky vypočteného posuvu tlusté desky s MKP odezvou snímače na jednotkový skok.

dosáhnout přiblížení k experimentu. Nicméně odfiltrováním vyšších frekvencí se dosáhne výrazného zlepšení.

ale v tomto případě nezajímají, protože je stejně nelze porovnat se změřeným elektrickým signálem. Časová nula je v místě příchodu čela dilatační vlny.

Obrázek 5 ukazuje tentýž průběh změřený válcovým snímačem (viz obrázek 1) na reálné tlusté desce. Vidíme, že shoda je poměrně dobrá. Odchyly se objevují například v podobě zákmitů na změřeném průběhu v okolí $t = 12 \cdot 10^{-6}$ a $t = 17 \cdot 10^{-6}$. Provedením konvoluce analytického průběhu s MKP odezvou použitého snímače na jednotkový skok se chceme přiblížit ke změřenému signálu. Pokusíme se tak alespoň částečně popsat cestu signálu přes elastické těleso, snímač a měřící aparaturu. Do jaké míry se to podařilo, ukazuje obrázek 6. Zejména na zmíněných dvou detailech je patrné, že k jitému přiblížení ke změřenému průběhu (obr.5) skutečně dochází. Pro rostoucí čas, kdy se odezvy snímačů přestávají podobat jednotkovému skoku, se shoda obecně zhoršuje. Výsledek konvoluce je cca o $1 \mu s$ zpožděn, což odpovídá průchodu dilatační vlny po délce piezoelementu.

Na konferenci budou dále uvedeny výsledky porovnání experimentu s konvolucí odezvy snímače a analyticky vypočteného posuvu kolmého k povrchu na stejné straně desky jako zdroj, v kolmé vzdálenosti 10 cm od místa buzení. Dále budou prezentovány výsledky na poloprostoru, kde vzhledem ke strmosti změn v průbězích je již mnohem obtížnější

Z výsledků konvolucí lze konstatovat, že uvedený způsob numerického modelování snímače (resp. i dalších snímačů) a výsledky hledání optimálního tvaru setrvačné hmoty lze i přes přijatá zjednodušení považovat za poměrně realistické.

Modální analýza snímače. Frekvenční spektra průběhů posuvu.

Cílem bylo porovnání frekvenčních spekter odezvy snímače na jednotkový skok, průběhů získaných konvolucí i průběhů naměřených s frekvencemi vypočtenými modální analýzou použitého válcového snímače. Očekávalo se, že alespoň ve spektrech MKP odezvy na jednotkový skok a ve spektrech průběhů vypočítaných konvolucí bude možno ukázat místa, kde je patrný vliv „parazitní“ frekvence, dodané odezvě numerického nebo i reálného modelu samotným kmitáním snímače.

Vlastní tvar	Frekvence [kHz]
1	15,96
2	291,5
3	323,0
4	416,5
5	465,3
6	540,3
7	628,0
8	658,0
9	750,9
10	765,3

Výsledky výpočtu vlastních frekvencí použitého válcového snímače z obr.1 jsou uvedeny v tabulce. Výrazně nižší frekvence prvního vlastního tvaru odpovídá axiálnímu kmitání tělíska piezokeramiky. Ostatní vlastní frekvence modelu snímače jsou pak dány zejména dominantním kmitáním tělesa setrvačné hmoty.

Toto porovnání však nelze technicky provést. Výsledkem výpočtu odezvy snímače z obr.1 na jednotkový skok je časový snímek délky 100 μ s, tvořený 2.000 časovými kroky. Z tohoto průběhu je možno provést FFT, ukazující frekvenční spektrum do 10 MHz, ale jen s krokem 10 kHz. To je krokování natolik řídké, že frekvence uvedené v tab.1 nelze ve frekvenčních

spektrech průběhů identifikovat. Připomeňme, že tento ještě „nedostatečný“ výpočet trval 2,5 dne a je na hranici technických možností.

Jediný užitečný výsledek, který frekvenční spektra průběhů vypočtených MKP dávají, je zcela jasné potvrzení existence mezní frekvence. Přibližně od frekvence 7 MHz (viz výše, mezní frekvence MKP modelu) je modul FFT roven nule.

Závěr.

Práce uvádí výsledky podrobné analýzy širokopásmového piezoelektrického snímače napětových vln. Z hlediska vlnového chování se podařilo charakterizovat vliv geometrie a velikosti setrvačné hmoty snímače. Zlepšení přenosových vlastností snímače lze dosáhnout nejen zvětšením setrvačné hmoty, ale i vhodným návrhem jejího tvaru. Optimální se jeví půlkulový tvar.

Pomocí konvoluce analytických řešení vlnových odezev těles a odezvy snímače na jednotkový skok řešené MKP se podařilo více přiblížit k průběhům získaným experimentálně. Je tak realizován druhý krok popisu cesty signálu od budícího zdroje přes elastické těleso, snímač a měřicí aparaturu. Prvním krokem byly exaktní analytické výpočty.

Ve frekvenční charakteristice konvoluovaných průběhů nebylo technicky možné provést identifikaci příspěvků vlastního kmitání snímače podle frekvencí získaných modální analýzou. To by vyžadovalo podstatně jemnější MKP výpočet, který nelze na dostupné technice realizovat.

Použitá literatura.

- [1] Pátek J.: *Využití výpočtů nestacionární napjatosti příčně buzené tenké a tlusté desky v diagnostických metodách*. Výzkumná zpráva 143VP, ÚFY FAV ZČU, 1996. Disertační práce.
- [2] *Teorie zobecněného paprsku a analýza tranzientních vln ve vícevrstevném pevném tělese*. Výzkumná zpráva 114VP, ÚTSSK ČSAV, Plzeň, 1992
- [3] Proctor T. M., Jr.: *An improved piezoelectric acoustic emission transducer*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol.71, No.5, 1982, pp.1163-1168.
- [4] Morávka Š.: *Porovnání analytického výpočtu nestacionární rázové napjatosti kontinua s diskrétním modelem MKP*. Sborník semináře "Výpočtová mechanika '96", ZČU, Plzeň, 1996, str. 171-178.
- [5] Morávka Š.: *Podélný ráz tlustých válcových polonekonečných tyčí - vyhodnocení výsledků analytického řešení a jeho porovnání s řešením MKP*. Výzkumná zpráva 141 VP, ÚFY FAV ZČU, 1996. Disertační práce.
- [6] Brepta R.: *Modifikace metody konečných prvků pro nestacionární problémy dynamiky*. Studie ČSAV, č. 13, Academia Praha, 1982.
- [7] *Materiálový list hmoty PK 274*. Terronic, a.s., Hradec Králové, 30.6.1992.
- [8] Hora P., Převorovský Z., Landa M., Morávka Š., Pátek J.: *Nové metody vyhodnocování signálů akustické emise*. Závěrečná zpráva o řešení grantu č.101/94/0971 GA ČR. Výzkumná zpráva 149 VP, ÚFY FAV ZČU, Plzeň, leden 1997.
- [9] Hora P., Pátek J.: *Tlustá deska - výsledky výpočtů a měření*. Výzkumná zpráva 133 VP, ITS ZČU, Plzeň, 1994.

Práce je součástí Záměru MŠMT č.J23/98:230000009 a byla částečně podporována grantem č. 101/97/P007 GA ČR - Modelování šíření napěťových vln pro účely zpětné rekonstrukce zdroje akustické emise.