

Moderní trendy v semi-aktivním potlačování přenosu hluku skrz okenní tabuli pomocí piezoelektrických aktuátorů

Lidé ve městech jsou vystaveni mnoha škodlivým vlivům na jejich zdraví a jedním z nich je všudypřítomný hluk. V současné době existuje velké množství kvalitních stavebních materiálů, které dokáží zajistit kvalitní zvukovou izolaci zděných částí budov. Nejméně zvukově odolným, avšak zcela nezastupitelným prvkem budov se tak stávají skleněná okenní tabule. Vývoj moderních metod zvyšujících zvukově izolační vlastnosti skleněných okenních tabulí představuje velkou výzvu pro odborníky různých technických odvětví. Aby bylo možné zkonstruovat efektivní systém pro potlačení hluku přenášeného skrze sklo, je důležité nejprve porozumět interakci skleněné tabule se zvukovou vlnou dopadající z vnějšího prostředí. Jedna z možností, jak přistoupit k potlačení přenesené zvukové vlny, je založena na využití vlastností piezoelektrických materiálů. V článku je prezentován moderní mechatronický systém pro semi-aktivní potlačení přenosu zvuku skrz skleněnou okenní tabuli. Systém je modelován pomocí numerické metody konečných prvků a jeho fungování je ověřeno realizováním experimentů využívajících metod digitální holografické interferometrie a měření akustických tlaků.

Technický rozvoj, který zažívá naše společnost, s sebou nese celou řadu negativních vlivů na zdraví člověka. Jedním z nich je nadměrný hluk, který závažně působí na fyzické i psychické zdraví populace. Člověk dnešní doby je vystaven působení hluku z mnoha zdrojů, jako je například silniční, železniční a letecká doprava a samozřejmě průmysl. Obytné, ale i kancelářské budovy ve městech jsou tak značně zatíženy těmito vlivy. Odstranění všech zmíněných zdrojů hluku je v dnešní době nemyslitelné, a proto je třeba alespoň zamezit jeho šíření do místností, kde lidé bydlí a pracují. Významný prvek, skrz který se hluk do místností přenáší, jsou skleněná okna. Se zvětšujícím se podílem prosklených částí budov se snižuje celková zvuková neprůzvučnost budovy. Okna jsou ve své podstatě tenké skleněné desky upevněné na svých krajích ve více či méně tuhém rámu. Skleněná deska tedy představuje rozhraní dvou vzduchových prostředí, na nichž se část dopadající zvukové vlny odrazí a jimiž část této vlny projde. Cílem všech metod zvyšujících zvukově izolační schopnosti stavebních prvků je, aby amplituda prošlé zvukové vlny byla co nejmenší. Odraz zvukové vlny od skleněné desky zpět do okolního prostředí způsobí, že se skleněná deska rozechvěje a tyto vzniklé vibrace se tak stávají zdrojem zvuku pro prostředí za sklem, tedy prostředí místnosti (obr. 1). Proto jsou okenní tabule běžných budov slabým článkem přenosu hluku do místnosti, právě díky své nízké ohybové tu-

hosti. Běžnou součástí průmyslových staveb i dopravních prostředků se staly pasivní prvky pohlcující či odrážející zvuk. Intenzita hluku ve městech se ale stále navyšuje, proto použití pasivních odhlučňovacích materiálů začíná být nedostatečným řešením. V oblasti nízkých frekvencí (pod 1 kHz) se navíc snižuje jejich zvukově izolační schopnost [1]. Je tedy třeba přistoupit k využití nových moderních metod potlačování hluku spojených s kontrolou jeho šíření. Důležitým požadavkem pro tyto metody je jejich efektivita v celém slyšitelném frekvenčním spektru, zejména ve frekvenční oblasti mezi 2 a 5 kHz, kde je lidský sluch nejvíce náchylný k poškození [2]. Výše zmíněné skutečnosti se staly motivací práce, která je prezentována v tomto článku a ve které studujeme možnosti zvýšení zvukových izolačních schopností skleněné okenní desky pomocí změny její geometrie s využitím piezoelektrických aktuátorů. Práce je založena na simulaci přenosu zvuku skrz skleněnou desku pomocí metody konečných prvků (MKP). Základní výsledky modelu jsou ověřeny experimentálními měřeními.

MĚŘENÍ ZVUKOVĚ IZOLAČNÍ SCHOPNOSTI SKLENĚNÉ DESKY

Měřitelnou fyzikální veličinou, která popisuje problém šíření zvuku skrze skleněnou tabuli, je *akustická přenosová ztráta* (Transmission Loss – TL). Tato veličina popisuje schopnost skleněné desky redukovat zvuk přenesený z venkovního prostředí. Je zřejmé, že snahou je co nejvíce zvýšit hodnotu TL. Akustická přenosová ztráta je definována jako poměr akustických tlaků vlny dopadající na skleněnou desku p_i a vlny skrze sklo přenesené p_t . Obvykle je vyjadřována v logaritmickém měřítku (decibelech). V situaci přenosu zvuku z jednoho prostředí do druhého skrz rozhraní, které v tomto případě tvoří skleněná deska, platí vztah využívající specifickou akustickou impedanci tohoto rozhraní Z_w [3]:

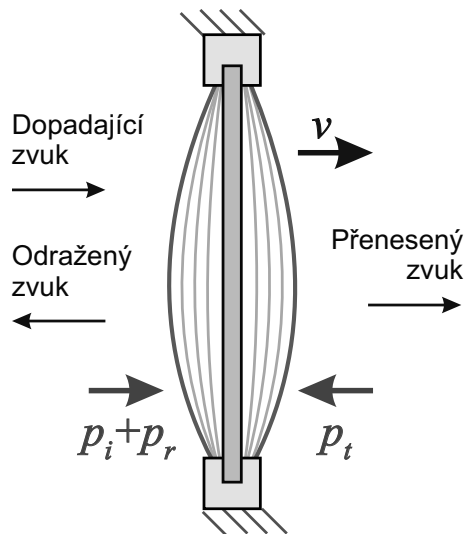
$$TL = 20 \log_{10} |1 + Z_w / (2Z_a)|,$$

kde $Z_a = \rho_0 c$ je specifická akustická impedance ve vzduchu, c je rychlost zvuku ve vzduchu a ρ_0 je hustota vzduchu. Specifická akustická impedance okenní tabule je funkce frekvence zvukové vlny a je dána jako

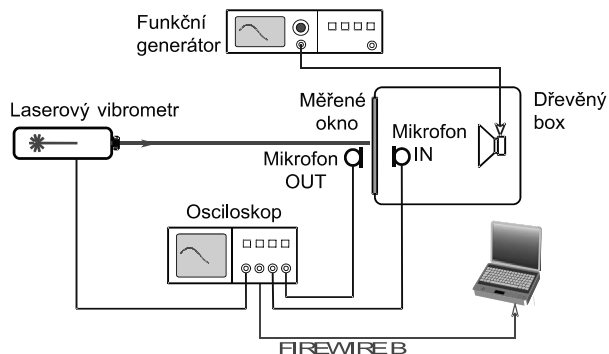
$$Z_w = [(p_i + p_r) - p_t] / v,$$

kde v je normálová rychlost vibrací skleněné desky.

Pro kvalitativní zhodnocení zvukově izolační schopnosti skleněné desky bylo využito měření specifické akustické impedance pomocí jednoduché experimentální aparatury zobrazené na obr. 2. Skleněná deska o tloušťce 4 mm byla upevněna v dřevěném rámu o vnitřních rozměrech 42 cm × 30 cm, který byl upevněn v akustickém boxu s reproductorem. Rozdíl akustických tlaků působících po obou stranách skleněné desky je měřen dvěma mikrofony. Amplituda rychlosti v ve středu okna je měřena laserovým vibrometrem.



Obr. 1 – Princip přenosu hluku skrz okenní desku. Dopadající zvuková vlna o akustickém tlaku p_i dopadá na skleněnou okenní tabuli. Ta se vlivem rozdílu akustických tlaků na obou stranách rozechvěje. Část energie dopadající zvukové vlny se odrazí (vlna s akustickým tlakem p_r) a část energie zvukové vlny projde (vlna s akustickým tlakem p_t).



Obr. 2 – Schéma experimentu pro měření akustické přenosové ztráty. Mikrofon IN uvnitř dřevěného boxu a mikrofon OUT vně boxu snímají rozdíl mezi akustickými tlaky po obou stranách skleněné desky. Mikrofony jsou umístěny ve vzdálenosti 1 cm od povrchu skleněné desky. Laserový vibrometr měří velikost rychlosti vibrací středního bodu skleněné desky. Z těchto naměřených hodnot je získána frekvenční závislost akustické přenosové ztráty TL skleněné desky.

SIMULACE PŘENOSOVÉ ZTRÁTY POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

Aby bylo možné navrhnout metody pro potlačení přenosu hluku skrz skleněnou desku, je nutné porozumět tomu, jakým způsobem se akustická vlna skrz skleněnou desku přenáší. Proto byla provedena celá řada numerických simulací. Akustická vlna reprezentuje zátěž harmonickým tlakem na spodní plochu skleněné desky. Mechanické okrajové podmínky jsou jednoduché. Dřevěný rám i box jsou pevně uchyceny ve svých pozicích a povrch skleněné desky je volný. Akustické okrajové podmínky jsou zadány pomocí akustické impedance borovicového dřeva ($9,5 \cdot 10^9 \text{ Pa s m}^{-1}$). Po zadání okrajových podmínek byla celá geometrie rozdělena na jednotlivé konečné elementy, jejichž maximální velikost nesmí přesáhnout jednu pětinu vlnové délky akustické vlny. Celý výpočet byl proveden jako dvě frekvenční analýzy zároveň – akustická a mechanická, vzájemně se ovlivňující. Akustická část vnáší do mechanické části úlohy zátěž v podobě akustického tlaku na skleněnou desku a mechanická část vnáší vypočtená normálová zrychlení do části akustické k tomu, aby mohlo být spočteno rozložení akustického tlaku. Pro mechanickou analýzu je určující druhý Newtonův pohybový zákon:

$$\rho(\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2) - \nabla \cdot \mathbf{c} \nabla \mathbf{u} = \mathbf{f},$$

kde $\mathbf{u}(x, y, z, t) = \mathbf{U}(x, y, z)e^{i\omega t}$ je vektor výchylky a \mathbf{f} je vektor síly harmonicky působícího akustického tlaku. Tímto jsou určeny vektory výchylek v každém uzlovém bodě sítě konečných elementů. Rozložení akustického tlaku v akustické analýze je určeno Helmholtzovou parciální diferenciální rovnicí:

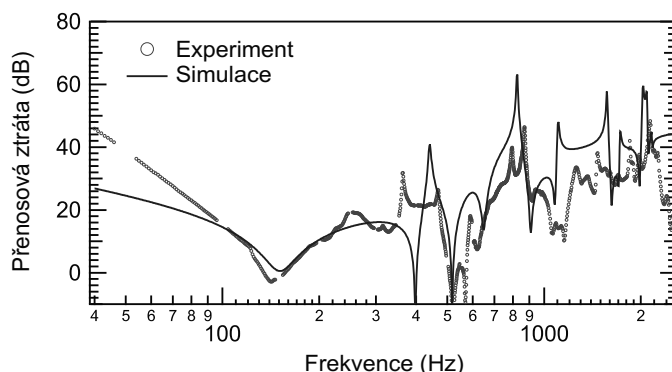
$$\nabla \cdot (-\nabla p / \rho_0) - (\omega^2 p) / (\rho_0 c^2) = 0,$$

kde p je akustický tlak s harmonickou frekvenční závislostí. Pozorovatelnými výsledky těchto výpočtů jsou veličiny mechanické, např. výchylky v každém uzlovém bodě struktury, mechanická napětí a deformace ve všech směrech, a zároveň veličiny akustické, jako jsou hlavně hodnoty akustického tlaku a jeho hladiny v decibelech. Mechanické veličiny nám dávají informaci o tom, při jakých frekvencích má skleněná deska největší výchylky vibrací a tedy kdy se přenesou nejvíce hluku. Akustické veličiny pak tento přenos kvantifikují, nejlépe rozdílem hladin akustického tlaku těsně před vstupem do skleněného rozhraní a těsně po výstupu z něj.

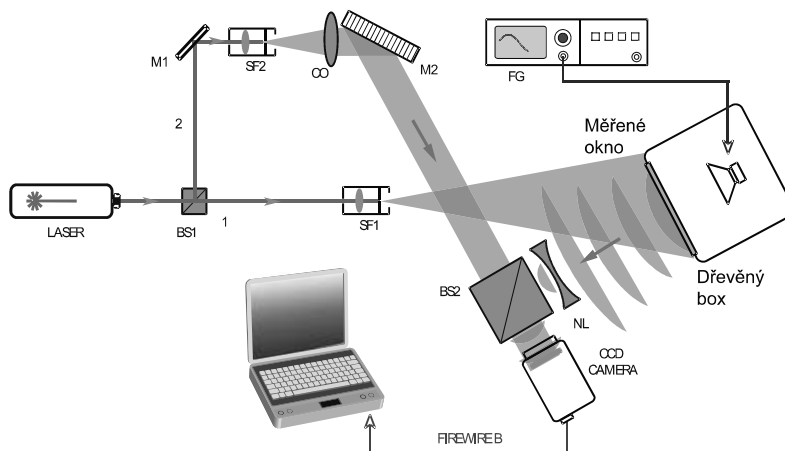
V našich numerických simulacích bylo použito následujících hodnot materiálových parametrů: hustota skla $2\,230 \text{ kg m}^{-3}$, hustota vzduchu $1,25 \text{ kg m}^{-3}$, Youngův modul pružnosti skla $72 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, rychlost zvuku ve skle $5\,200 \text{ m s}^{-1}$ a rychlost zvuku ve vzduchu 343 m s^{-1} . Obr. 3 porovnává frekvenční závislost přenosové ztráty naměřené pomocí experimentálního systému, zobrazeném na obr. 2, s výsledky numerické simulace systému pomocí modelu MKP.

VIZUALIZACE VIBRAČNÍCH MÓDŮ VIBRUJÍCÍ SKLENĚNÉ DESKY

Pro pochopení zákonitostí přenosu zvuku skrz skleněnou desku je nutné získat detailní znalosti o vibračních módech skleněné desky. Za tímto účelem byly realizovány experimenty pro přímé zobrazení vý-



Obr. 3 – Porovnání akustické přenosové ztráty určené experimentem zobrazeným na obr. 2 s výsledky simulace metodou konečných prvků (MKP)



Obr. 4 – Schéma experimentu pro zobrazení vibračních módů chvějící se skleněné desky pomocí digitální holografické interferometrie. Laserový paprsek je rozdělen na referenční a měřící svazek. Měřící svazek dopadá na vibrující nebo staticky deformovanou skleněnou desku, od které se odráží a je optickou soustavou přiveden do CCD kamery, kde interferuje s referenčním svazkem. Z rozdílů interferenčních obrazců snímá CCD kamerou před a po deformaci je možné rekonstruovat výchylku skleněné desky.

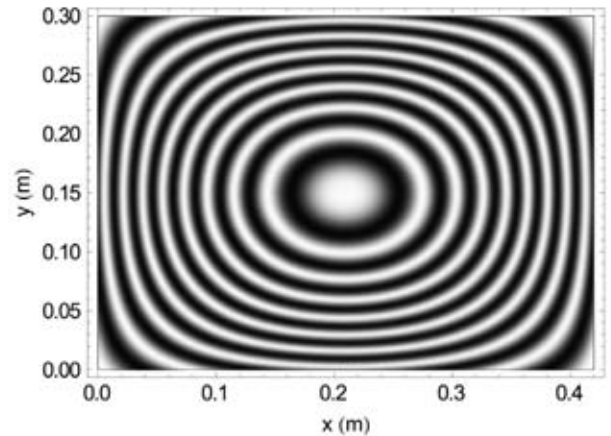
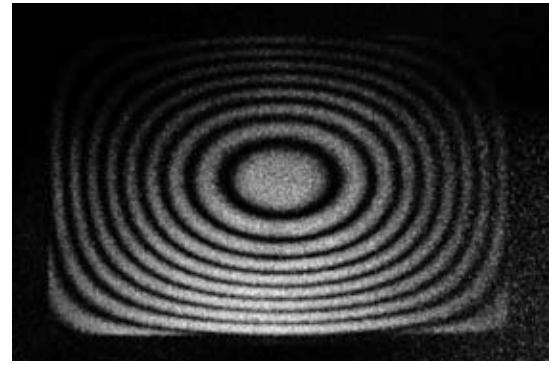
chylky vibrujícího povrchu skleněné okenní desky pomocí digitální holografické interferometrie. Experimentální uspořádání metody je zobrazeno na obr. 4. Laserový paprsek se rozdělí na referenční a měřicí svazek. Měřicí svazek dopadá na vibrující nebo staticky deformovanou skleněnou desku, od které se odráží a je optickou soustavou přiveden do CCD kamery, kde interferuje s referenčním svazkem. Z rozdílu interferenčních obrazců snímaných CCD kamerou před a po deformaci je možné rekonstruovat výchylku skleněné desky.

Obrázek 5 zobrazuje porovnání experimentálního zobrazení základního vibračního módu skleněné desky kmitající na frekvenci 149 Hz (obr. 5a) a její porovnání s výsledky simulace pomocí modelu MKP. Digitální holografická interferometrie zobrazuje výchylku na povrchu skla prostřednictvím systému interferenčních proužků tak, že výchylka na dvou tmavých místech na povrchu skla, která jsou oddělena světlým proužkem, se liší o 156 nm.

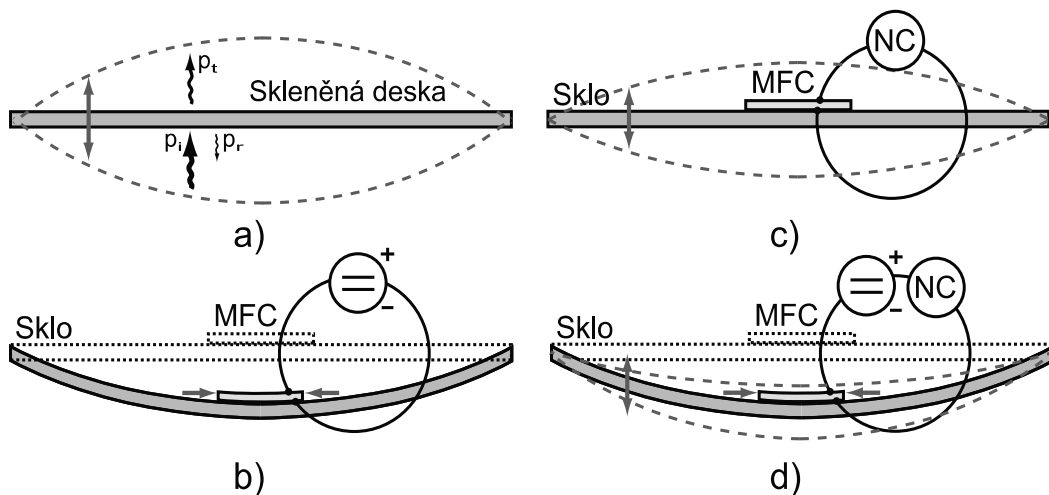
PRINCIPY ZVÝŠENÍ ZVUKOVĚ IZOLAČNÍCH SCHOPNOSTÍ SKLENĚNÉ DESKY

Zvýšení zvukově izolačních schopností skleněné desky je možné docílit pomocí jednoduchého principu. Pokud se podaří snížit amplitudu výchylky vibrací skleněné desky, klesne amplituda rychlosti v kmitání desky, tím se sníží hodnota specifické akustické impedance Z_w a naopak se zvýší hodnota akustické přenosové ztráty TL . Snížení hodnoty specifické akustické impedance je možné docílit jednak změnou geometrie skleněné desky a nebo zvýšením její ohybové tuhosti. Obou těchto jevů je možné docílit pomocí aktuátorů tvořených piezoelektrickými materiály nalepenými na povrch skleněné desky.

Piezoelektrické materiály je skupina anizotropních materiálů vyznačujících se tzv. přímým a převráceným piezoelektrickým jevem. Přímý piezoelektrický jev nastane, zapůsobíme-li mechanickou silou na piezoelektrický prvek a na jeho elektrodách se vytvoří elektrický náboj, který je přímo úměrný působícímu mechanickému napětí. Převrácený piezoelektrický jev nastane, přivedeme-li elektrické napětí na elektrody piezoelektrického prvku a ten se defor-



Obr. 5 – Porovnání experimentální vizualizace kmitání okenní skleněné tabule pomocí digitální holografické interferometrie a) s výsledky simulace pomocí modelu MKP b)



Obr. 6 – a) Přenos zvukové vlny skrze skleněnou desku; b) Prohnutí skleněné desky způsobené stejnosměrným elektrickým napětím přivedeným na elektrody MFC aktuátoru. MFC se díky svým piezoelektrickým vlastnostem deformuje a způsobí tak mechanické deformace skleněné desky; c) Efektivní tuhost MFC aktuátoru je ovládána paralelně připojeným aktivním elektronickým obvodem NC. Efektivní tuhost piezoelektrického aktuátoru je zvyšována, amplituda vibrací skleněné desky se snižuje. Je tak dosaženo toho, že větší část akustické vlny se odrazí, než projde skrze skleněnou tabuli; d) Kombinace obou způsobů potlačení hluku skrze skleněnou desku. Předepjatá deska s piezoelektrickým MFC aktuátorem s paralelně připojeným NC obvodem, který zvyšuje tuhost MFC aktuátoru.

muje přímo úměrně přiloženému elektrickému napětí. Pomocí piezoelektrických aktuátorů nalepených na skleněnou desku je možno využít k aktivnímu zvýšení ohybové tuhosti skleněné desky a zabránit tak jejímu rozvibrování, které je samotným zdrojem hluku v místnosti.

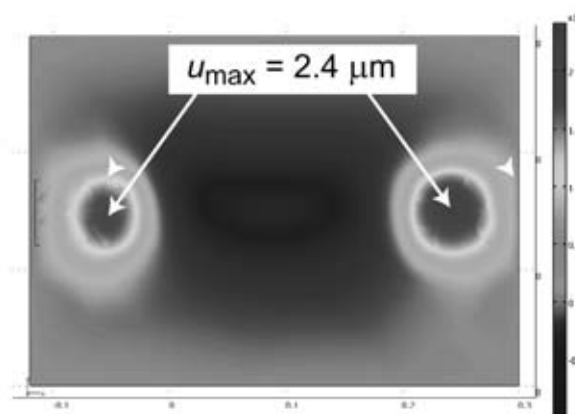
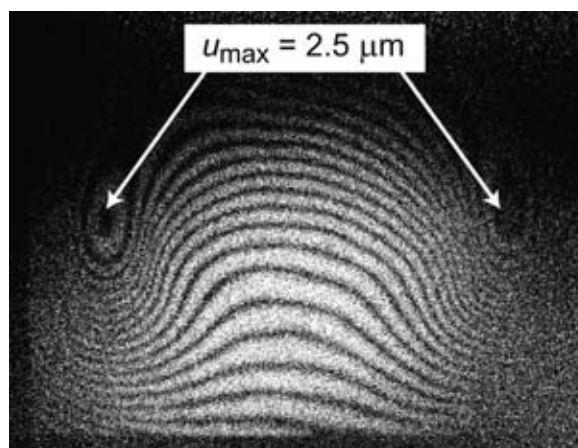
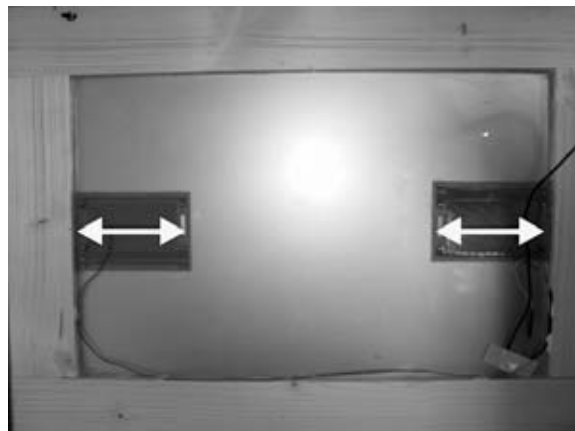
Piezoelektrický prvek, který je dostatečně tvarově flexibilní a je možné ho bez problémů připevnit na skleněnou desku, aniž by došlo k poškození, je Macro Fibre Composite (MFC) aktuátor. Tento unikátní piezoelektrický kompozit byl vyvinut vědeckým centrem pro vývoj leteckých a kosmických aplikací NASA's Langley Research [4] a od roku 2002 jej vyrábí Smart Materiál Corporation, USA [5]. Skládá se z mnoha piezokeramických vláken zalitých v epoxidové matrici, uzavřených vrstvou interdigitálních elektrod. Takovéto typy piezokeramických kompozitů vznikly proto, aby bylo předcházeno častému poškození aktuátorů vyrobených z monolitické keramiky. Destičky z monolitické piezoelektrické keramiky jsou velmi křehké, z čehož plyne jejich špatná přizpůsobivost tvaru aplikace (obzvláště jedná-li se o nerovinné útvary nebo, v případě skleněného okna, o křehký materiál). Díky své konstrukci MFC aktuátor dokáže být odolný a flexibilní, tvaru aplikace se velmi dobře přizpůsobí. Ve své podstatě je to piezoelektrický aktuátor s elastickými vlastnostmi epoxidu [6].

V principu jsou dva možné způsoby, jak přistoupit k potlačení hluku skrze skleněnou desku. Prvním z nich je statické prohnutí skla tím, že je na elektrody MFC aktuátoru, který je přilepený na skle, přivedeno stejnosměrné elektrické napětí. Schéma tohoto systému je naznačeno na obr. 6b. Prohnutí skleněné desky způsobí změnu geometrie systému, což se projeví výskytem dodatečných členů v pohybových rovnicích. Tyto dodatečné členy jsou funkcí elastických vlastností skla a je jasné, že ovlivní výsledný tvar vztahu pro akustickou přenosovou ztrátu TL . V práci [7] bylo ukázáno, že zakřivení původně rovinné geometrie systému zvýší hodnotu TL zejména v nízkofrekvenční oblasti.

Druhý způsob potlačení hluku přenášející se skrze skleněnou desku je založen na zvýšení ohybové tuhosti desky. K MFC aktuátoru, který je přilepený na skle, je paralelně připojen aktivní elektronický obvod emulující zápornou kapacitu, který je často označován jako NC obvod (obr. 6c) [8]. Pokud pomocí NC obvodu připojeného k MFC aktuátoru dojde ke zvýšení ohybové tuhosti skleněné desky, zmenší se výchylka vibrací desky a zvětší se poměr amplitud akustických vln, odražené ku přenesené. Výhodami této metody je použití piezoelektrického elementu jako senzoru i aktuátoru současně a její použití v široké oblasti frekvencí (10 Hz – 100 kHz [9]). Oba výše zmíněné způsoby potlačení hluku lze kombinovat (obr. 6d). Simulacemi metodou konečných prvků a laboratorními měřeními je možné zjistit, který z navržených způsobů tlumení přenosu hluku je efektivnější.

ZHODNOCENÍ POTENCIÁLNÍCH PŘÍSTUPŮ K ZVÝŠENÍ ZVUKOVĚ IZOLAČNÍCH SCHOPNOSTÍ SKLENĚNÉ OKENNÍ DESKY POMOCÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ MKP

Nejprve byla analyzována možnost změny geometrie skleněné desky pomocí dvou přilepených piezoelektrických MFC aktuátorů zobrazených na obr. 7a). Bílé šipky označují směr prodloužení a zkrácení piezoelektrického aktuátoru při přivedení elektrického napětí na jeho elektrody. Při stejné deformaci obou aktuátorů je možné očekávat změnu geometrie skleněné desky. Experimentální vizualizace průhybu skleněné desky pomocí digitální holografické interferometrie je zobrazena na obr. 7b). Z tohoto obrázku je patrné, že maximální výchylka skleněné desky při přivedení stejnosměrného napětí 300 V na elektrody aktuátoru činí 2,5 μm , obr. 7c) představuje numerickou simulaci dané situace pomocí MKP. V numerické simulaci bylo použito efektivních hodnot materiálových parametrů MFC aktuátoru vypočítaných podle teorie 1-3 kompozitů [10]. Porovnáním obr. 7b) a 7c) jsou vidět dobré shody vý-



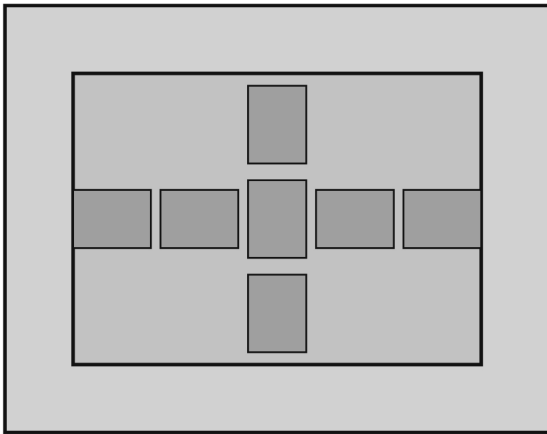
Obr. 7 – Statické prohnutí skleněné desky pomocí MFC aktuátoru. Fotografie měřené skleněné desky v dřevěném rámu a s nalepenými dvěma MFC aktuátory; směr šipek označuje směr deformace piezoelektrického MFC aktuátoru a), holograficky pořízený snímek výchylky celé plochy skleněné desky b) a výsledek simulace FEM modelu výchylky ve směru osy z skleněné desky se dvěma MFC aktuátory, na jejichž elektrody je přivedeno stejnosměrné elektrické napětí 300 V c). Je vidět, že je dosaženo velmi dobrého souhlasu výsledků simulačního modelu s výsledky experimentu.

sledků simulace modelu MKP s experimentálním pozorováním pomocí digitální holografické interferometrie. Měření akustické přenosové ztráty v tomto uspořádání bohužel neprokázalo pozitivní vliv na zvukově izolační vlastnosti takto deformované skleněné desky.

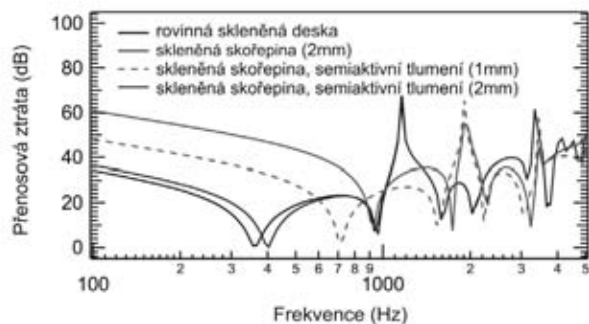
Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k simulaci systému piezoelektrických MFC aktuátorů zobrazených na obr. 8. Výsledky simulací jsou zobrazeny na obr. 9. Černá čára zobrazuje frekvenční závislost akustické přenosové ztráty rovinné skleněné desky. Modrá čára představuje frekvenční závislost přenosové ztráty skrz skleněnou skořepinu, jejíž průhyb je popsán funkcí:

$$z = z_{max} \sin[(\pi x)/a] \sin[(\pi y)/b],$$

kde $z_{max} = 2 \text{ mm}$ je maximální průhyb skořepiny v jejím středovém, $a = 0,42 \text{ m}$ a $b = 0,3 \text{ m}$ jsou rozměry rámu. Červené čáry zobrazují hodnoty přenosové ztráty v systémech, kdy na skleněnou skořepinu s maximálními průhyby $z_{max} = 1 \text{ mm}$ (čárkovaně) a $z_{max} = 2 \text{ mm}$ (plně) byl nalepen systém piezoelektrických aktuátorů zobrazený na obr. 8. Bylo předpokládáno, že ke každému piezoelektrickému MFC aktuátoru byl připojen aktivní elektrický NC obvod, jehož činností je docíleno efektivního zvýšení Youngova modulu MFC aktuátoru o faktor 10^4 . Simulace naznačují, že tímto způsobem je možné zvýšit akustickou přenosovou ztrátu o 20 dB ve frekvenční oblasti od 10 Hz do 900 Hz.



Obr. 8 – Geometrie modelu více MFC aktuátorů připevněných na skleněné desce



Obr. 9 – Simulace přenosové ztráty pomocí modelu MKP odpovídající experimentálnímu uspořádání zobrazeným na obr. 2. Frekvenční závislost přenosové ztráty skrz rovnou skleněnou desku (černá čára) je porovnána s přenosovou ztrátou skrz skleněnou skořepinu s výchylkou 2 mm ve středu desky. Červené čáry zobrazují frekvenční závislost přenosové ztráty skrz skleněnou skořepinu vychýlené o 1 mm (čárkovaná čára) a 2 mm (plná čára) ve středu desky a doplněné o systém piezoelektrických MFC aktuátorů zobrazený na obr. 8 a připojených k aktivnímu elektrickému obvodu. Je vidět, že tímto přístupem je možné docílit zvýšení přenosové ztráty až o 20 dB ve frekvenční oblasti od 10 Hz do 900 Hz.

SHRNUTÍ

Na závěr lze shrnout, že pomocí MFC aktuátorů, přilepených na sklo a řízených elektronickým obvodem, je možné změnit geometrii systému skleněné desky či ovlivnit její ohybovou tuhost. Bylo dosaženo uspokojivého souhlasu modelovaných a experimentálních dat na frekvenčním pásmu 100–1 000 Hz. Numerické simulace ukazují, že při optimálním nastavení parametrů elektronického obvodu a umístění MFC aktuátorů bude možné účinně zvýšit zvukovou neprůzvučnost oken.

Článek vznikl s podporou grantu GAČR 101/08/1279 *Moderní metody potlačování hluku a vibrací pomocí piezoelektrických materiálů* a grantu SGS 2001/7821 – *Interaktivní mechatronické systémy v technické kybernetice*.

Ing. Kateřina Nováková,
katerina.novakova@tul.cz,
doc. Ing. Pavel Mokřý, Ph.D.,
pavel.mokry@tul.cz,
Ing. Jan Václavík,
jan.vaclavik@tul.cz,
Ing. Vít Lédl, Ph.D.,
vit.ledl@tul.cz,

**Fakulta mechatroniky, informatiky
 a mezioborových studií
 Technické univerzity v Liberci**



Ing. Kateřina Nováková

Je od roku 2006 v doktorském studijním programu Přírodovědné inženýrství na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Zde se věnuje návrhu systémů pro potlačení hluku a vibrací využívajících piezoelektrické materiály. Její práce se soustřeďuje zejména na využití metody konečných prvků.



doc. Ing. Pavel Mokřý, Ph.D.

Je zaměstnán od roku 2006 jako docent na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Zde se věnuje základnímu výzkumu piezoelektrických materiálů a jejich aplikacím v systémech pro potlačení hluku a vibrací. Předtím absolvoval dva dlouhodobé pracovní pobyty v Japonsku (Kobayasi Institute of Physical Research, Tokio) a Švýcarsku (Švýcarský národní polytechnický institut, Lausanne).



Ing. Jan Václavík

Je zaměstnán od roku 2004 jako odborný asistent na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Zde se věnuje výkonové elektronice se zaměřením na spínané zdroje a zesilovače. Předtím absolvoval studijní stáž ve Francii (Université Paul Sabatier III., Toulouse).



Ing. Lédl Vít, Ph.D.

Je zaměstnán od roku 2004 jako odborný asistent na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Zde se věnuje zejména laserové holografické interferometrii a optickým měřicím koherentním metodám. Předtím absolvoval odbornou stáž v CERN, Ženeva, Švýcarsko, kde se podílel na vývoji detektoru ATLAS, který je součástí Velkého hadronového urychlovače LHC.