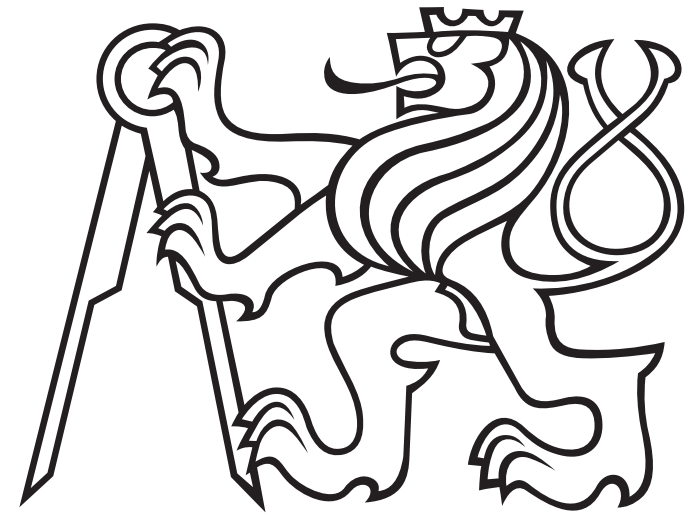


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

RESUMÉ

Předkládaná práce se zabývá metodou aktivního řízení vyzařování zvuku (*Active structural Acoustic Control*, ASAC) s využitím momentových měničů. Jedná se o moderní řešení aktivního snižování hluku, kdy je zvuk vyzařovaný kmitajícím tělesem potlačován prostřednictvím na těleso působících mechanických sil. ASAC představuje hybridní pojitko mezi metodami aktivního řízení hluku a vibrací. S první má společný cíl a s druhou prostředky.

V práci je v nezbytném rozsahu pojednáno o kmitání tenkých desek a o vyzařování zvuku z rovinných zdrojů. Těžištěm práce je popis navrženého momentového měniče. Ten využívá piezoelektrických bimorfů (dvojčat) jednostranně vetknutých do kovového úchytu. Po připojení zdroje střídavého napětí začnou bimorfy kmitat a podél osy úchytu vzniká v důsledku setrvačnosti dynamický ohybový moment. Ze stavových rovnic piezoelektrických látek je odvozen vztah pro amplitudové spektrum generovaného momentu a je ukázáno, že je lineárně závislý na vnějším elektrickém napětí. Pro zesílení účinku je navíc využíváno mechanické resonance piezoelektrických pásků.

Matematický model momentového měniče je využit k návrhu jednobokanového feedforward systému řízení vyzařování zvuku z tenkého ocelového plechu po obvodu prostě podepřeného. Je řešena optimalizace polohy momentového měniče pro případ dvou chybových kritérií – snižování akustického tlaku v diskrétním bodě a snižování celkového vyzařovaného výkonu. Je ukázáno, že v případě snižování výkonu má vhodná pozice měniče zásadní vliv. V nalezené optimální poloze je vypočteno rozložení akustického tlaku nad zdrojem po obě chybová kritéria. Na základě výsledků této analýzy jsou formulována doporučení pro umístování měničů.

Experimentální výsledky ověřily správnost modelu a upřesnily jeho parametry. Byly testovány jedno a dvoubokanové systémy aktivního řízení vyzařování. Při tónovém buzení byla v jednobokanovém systému snížena hladina vyzařovaného výkonu o 14 dB a hladina akustického tlaku v místě chybového mikrofónu o více než 30 dB. K optimalizaci polohy měniče bylo využito strukturální intenzity vypočtené z naměřeného rozložení komplexní rychlosti kmitajícího povrchu. V nových experimentech s aktivním řízením okrajové podmínky bylo dosaženo slibných výsledků, a proto koncept dále rozvíjíme a vyvíjíme aktivně řízený dvojitý panel.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra fyziky

Petr Švec

AKTIVNÍ ŘÍZENÍ VYZAŘOVÁNÍ S VYUŽITÍM MOMENTOVÉHO BUZENÍ

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Akustika

Teze disertace k získání akademického titulu „doktor“ ve zkratce „Ph.D.“

Praha, duben 2012

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře fyziky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Petr Švec
Katedra fyziky
ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická
Technická 2, 166 27, Praha 6

Školitel: prof. Ing. Ondřej Jiříček, CSc.
Katedra fyziky
ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická
Technická 2, 166 27, Praha 6

Oponenti:
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru „Akustika“
v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.
S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické
ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Tech-
nická 2, Praha 6.

.....
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Akustika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

SUMMARY

The thesis deals with design and analysis of an active structural acoustic control (ASAC) system using line moment actuators, specially designed for the purpose. The ASAC method is a modern approach in noise control engineering. The sound pressure radiated by a vibrating body is suppressed by actions of control forces applied to the structure. It is closely related to active noise and vibration control. With the former it has the same objective, but it uses actuators as the latter.

Theory of thin vibrating plates is briefly discussed along with theory of sound radiation from planar structures. The main part of the work deals with design of new type of moment actuator. The actuator consists of piezoelectric bimorphs clamped at one side to a metallic handle. When external electric voltage is applied, the bimorphs start to oscillate and bending moment arises along the handle as a result of inertial force. Using piezoelectric state equations, simplified formulas for amplitude spectrum of generated bending moment is derived. It is shown, that the moment is linearly dependent upon the applied voltage. The actuator uses mechanical resonance of the stripes to maximize the generated moment.

Mathematical model of the line moment actuator is used to estimate its performance in single channel feed-forward active control experiment of simply supported steel plate. Optimal position of the actuator is calculated for two error criterions: minimization of sound pressure at discrete point and minimization of total radiated power. It is demonstrated, that actuator position plays a crucial role when radiated power is minimized. For the optimal position of the moment actuator, normal velocity distribution of the plate surface and radiated sound field is calculated. According to these results, recommendations applicable during system design are provided. Experiments with the actuator are presented and proposed ASAC system design is verified. Single and double channel systems are studied. The results showed, that with a single actuator, tonal noise can be efficiently reduced by 14 dB in sound power level and over 30 dB in sound pressure level. Structural intensity calculated from measured complex velocity distribution is used for optimization of actuator position in our experiments. The latest experiments with active control of plate boundary condition using the moment actuator showed promising results and lead to a concept of actively controlled double panel that will be soon presented.

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Zvuky tvoří nedílnou součást lidského života a slouží člověku k dorozumívání, prostorové orientaci i zábavě. Kromě zvuků žádoucích nás s pokrokem civilizace obklopuje i stále více zvuků rušivých a nežádoucích, které stručně označujeme jako hluk. Dlouhodobé vystavení člověka nadměrnému hluku je v současné době stále častějším jevem. Ať se jedná o dopravní hluk nebo hluk strojů, jde o závažný a obtěžující problém ovlivňující výkonnost při práci i zdraví. Proto pozorujeme neustálý nárůst poptávky po akustických úpravách.

K akustickým úpravám se využívá mnoho odlišných metod, které lze rozdělit do dvou skupin – na pasivní, založené na absorpci a disipaci zvukové energie a na aktivní, využívající jevu destruktivní interference a linearity zvukového pole, resp. z ní plynoucí princip superpozice. Princip aktivního řízení hluku (*Active Noise Control*, ANC) pochází od německého fyzika Paula Lüga [1]. Ten 27. ledna 1933 podal v Německu patentovou přihlášku na systém aktivního řízení hluku. Po nezbytném posouzení armádními úřady byla nová metoda odtajněna coby vojensky nevyužitelná. To Lügovi umožnilo v březnu 1934 zažádat o patent i v USA. Za tento krok byl následně nacisty označen za zrádce národa, a tím skončila jeho kariéra fyzika. Tak ve svých více jak čtyřiceti letech vystudoval lékařskou fakultu a až do své smrti v roce 1979 působil jako lékař v rodném Kolíně nad Rýnem.

Myšlenka metody spočívá v přidání tzv. sekundárních zdrojů zvuku do prostoru, kde chceme snížit hluk. Sekundární zdroje vyzařují zvuk získaný zpracováním tzv. referenčního signálu (ne nutně akustického), který je korelován se signálem, jež má být potlačen. V řízeném prostoru pak dojde destruktivní interferencí ke snížení akustického tlaku, který měříme chybovým mikrofonom, jehož signál je použit k nastavení řídicí jednotky.

Obdobný je princip aktivního řízení vibrací (*Active Vibration Control*, AVC), kde namísto akustického tlaku tlumíme vibrace struktury s využitím zdrojů mechanických sil nebo momentů. Nejčastěji jsou používány elektrodynamické, hydraulické nebo piezoelektrické měniče.

První realizace těchto systémů z padesátých a šedesátých let byly limitovány možnostmi analogového zpracování signálů. Významnější pokrok nastal teprve v sedmdesátých letech s nástupem číslicové techniky. Až

rozvoj digitálních signálových procesorů umožnil realizaci komerčně využitelných systémů aktivního řízení hluku a vibrací.

Praktický význam mají tyto technologicky pokročilé metody při potlačování nežádoucích zvuků či vibrací na nízkých frekvencích, kde je aplikace ostatních metod (izolace, pohltivé obklady apod.) z důvodů hmotnosti či rozměrů nepoužitelná.

Při ANC dochází obvykle ke vzniku tzv. zón ticha, prostorově vymezených oblastí, kde jsou splněny přísné fázové požadavky destruktivní interference. Celkově přitom dochází ke zvýšení hustoty akustické energie. Možnostmi globálního útlumu minimalizací výkonu primárního zdroje se zabývali např. Elliott a Tanaka [2,3].

V devadesátých letech se začaly objevovat hybridní systémy pro aktivní řízení vyzařování zvuku (Active Structural Acoustic Control, zkráceně ASAC). Tento přístup spojuje aktivní řízení hluku s aktivním řízením vibrací. S metodou ANC má společný cíl, potlačit vyzařovaný zvuk, nicméně prostředky, jimiž je tohoto cíle dosahováno jsou mechanické síly, jako u AVC. Může se jednat o samostatně vyzařující elementy pokrývající vyzařující povrch [4, 5] nebo o měniče mechanicky působící na kmitající povrch [6]. Útlumu dosahujeme dvěma mechanismy, utlumením nejsilnější vyzařujících módů (modal control) a přeuspořádáním uzlů a kmiten (modal rearrangement), čímž dojde ke snížení vyzařovací účinnosti [4, 7, 8].

Systémy ASAC mohou užívat akustické chybové senzory snímající tlak v blízkém či vzdáleném poli, akustickou intenzitu nebo celkovou hustotu energie. Pro kompaktnější návrh však lze využít také snímání střední objemové rychlosti zdroje nebo tzv. modální filtr [6,9]. Objemovou rychlost měřit řadou akcelerometrů [10] nebo distribuovanými piezoelektrickými snímači [6]. Rozhodující vliv na účinnost těchto systémů má poloha sekundárních měničů, jejíž optimalizace představuje v obecných případech náročný úkol, obvykle je nutné ji provést numerickou simulací nebo vyjít z přibližných řešení a empirických zkušeností.

Dnešní možnosti snižování hluku jsou mnohem větší než za Lügových dob. Moderní přístupy jako zde popisované aktivní řízení vyzařování se uplatňují v praxi stále častěji, což vede k jejich zlevňování. Rovněž pokrok v oblasti číslicového zpracování signálů spolu s rostoucím výkonem signá-

- [7] Koutný, A. – Švec, P.: *Porovnání regularizačních metod v akustické holografii a volba optimálních parametrů*. In 80. akustický seminář. Praha: Česká akustická společnost, 2010, s. 35–43. ISBN 978-80-01-04547-3.
- [8] Jiříček, O. – Koutný, A. – Švec, P. – Brothánek, M. – Jandák, V.: *Non-equidistant k-space sampling in statistically optimized near-field acoustic holography*. In Workshop 2011, CTU Student Grant Competition in 2010 (SGS 2010) [CD-ROM]. Praha: ČVTVS, 2011.
- [9] Koutný, A. – Švec, P. – Jiříček, O.: *Application of modified SONAH to velocity reconstruction of experimental mock-up*. In Proceedings of Inter-noise 2011 [CD-ROM]. Kyoto: Acoustical Society of Japan, 2011, ISSN 0105-175X.
- [10] Koutný, A. – Švec, P. – Jiříček, O.: *Near-field Acoustic Holography Based on Combined Elementary Wave Model*. In Proceedings of Forum Acusticum 2011 [CD-ROM]. Madrid: European Acoustics Association, 2011, p. 2861-2864. ISBN 978-84-694-1520-7.
- [11] Koutný, A. – Švec, P. – Jiříček, O. – Brothánek, M.: *Akustická holografie v blízkém poli založená na kombinovaném modelu vlnových funkcí*. In Sborník 82. akustického semináře. Praha: Česká akustická společnost, 2011, s. 25–31. ISBN 978-80-01-04814-6.

Podíl autorů je u všech publikací shodný.

Seznam publikací disertanta je členěn podle formálních požadavků (publikace v impaktovaných časopisech, recenzovaných časopisech, patenty, publikace excerpované WOS a publikace ostatní).

Bez ohlasů a recenzí

Seznam prací disertanta nevztahujících se k disertaci

- Publikace v impaktovaných časopisech
- [1] Brothánek, M – Jandák, V. – Jiříček, O. – Švec, P.: *Monoaural and binaural parameters of Rudolfinum concert halls in Prague*, Applied Acoustics, APAC-D-12-00085, 2012.
- Patenty
- Publikace excerpované WOS
- Publikace v recenzovaných časopisech
- Publikace ostatní
- [2] Švec, P. – Brothánek, M.: *Aplikace numerických metod v akustice*, Sborník 70. akustického semináře, Opočno, 2005.
- [3] Jandák, V. – Švec, P. – Jiříček, O. – Brothánek, M.: *In situ sound absorption measurement in car interior*. In Proceedings of Euronoise 2009 [CD-ROM]. St. Albans: Institute of Acoustics, 2009.
- [4] Koutný, A. – Jiříček, O. – Švec, P.: *Intenzitní p-u sonda pro měření akustické impedance*. In Sborník 79. akustického semináře. Praha: Česká akustická společnost, 2009, s. 5–16. ISBN 978-80-01-04427-8.
- [5] Jiříček, O. – Švec, P. – Jandák, V. – Brothánek, M.: *Comparison of sound absorption measurement methods*. In Proceedings of the Inter-Noise 2009 [CD-ROM]. Washington, DC: Institute of Noise Control Engineering of the USA, 2009.
- [6] Koutný, A. – Švec, P. – Jiříček, O.: *Comparison of Near-field Acoustic Holography Regularization Methods*. In Proceedings of EUROREGIO 2010. Ljubljana: Slovenian Acoustical Society, 2010, . ISBN 978-961-269-283-4.

lových procesorů dnes umožňuje navrhovat i velmi komplexní systémy využívající náročné algoritmy, například na bázi neuronových sítí.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je posouzení možnosti využití momentových měničů v systémech aktivního řízení vyzařování zvuku z tenkých desek. Pro tento účel bylo nutné navrhnout a zkonstruovat momentový měnič, teoreticky popsat jeho chování a experimentálně jej ověřit. Pro použití momentových měničů v reálném návrhu bylo rovněž nutné vytvořit matematický model umožňující aproximovat chování navrhovaného systému. Pro realizaci je uvažován pouze přístup feedforward s algoritmy LMS a F-x LMS implementovanými do vhodné řídicí jednotky. K ověření bylo rovněž třeba připravit vhodné experimenty, jejich výsledky porovnat s předpovědí modelu.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Úvodní teoretická kapitola se zabývá šířením mechanických vln v pevných látkách, přičemž pozornost je zaměřena zejména na vlny v tenkých deskách. V případě ohybových vln jsou diskutovány vlivy rotační setrvačnosti a smykové deformace elementu ohybem namáhané desky. Návrh a popis činnosti momentového měniče, obsažený ve třetí kapitole, představuje těžiště práce. Jsou odvozeny vztahy pro amplitudové spektrum generovaného dynamického momentu a jeho závislosti na budícím napětí pro případ měniče s jedním bimorfem. Oproti jiným v literatuře popísaným momentovým měničům má zde prezentovaný přístup výhodu nižšího řídicího napětí a jednoduchosti konstrukce. Generovaný moment působí pouze podél osy úchyty bimorfů, jedná se tak o zdroj prostého lineového momentu, nikoli o kombinaci více vzájemně provázaných lineových či distribuovaných momentů. K zesílení účinku je navíc využito mechanické rezonance aktivních prvků. Měnič byl přizpůsoben napájení běžnými audio-zesilovači, které jsou levnější i dostupnější než specializované zdroje pro napájení piezoelektrických měničů.

Na základě teoretických úvah a experimentálních výsledků byl popsán na zjednodušeném příkladu prostě podepřené čtvercové desky návrh jednokanálového systému aktivního řízení vyzařování zvuku. V nezbytné

míře byly shrnuty vztahy popisující řídicí algoritmus $F-x$ LMS a z nich plynoucí přibližné řešení pro optimální hodnoty řídicích momentů. Model prokázal zásadní vliv polohy sekundárního měniče na dosažitelné výsledky, zatímco poloha chybového snímače představuje, zejména při minimalizaci akustického tlaku, méně citlivý parametr. Při řízení celkového vyzařovaného výkonu však nabývá na významu a je nutné hledat vhodnou polohu chybového senzoru. Na základě této analýzy byla formulována doporučení pro volbu polohy sekundárního měniče v praktických případech.

4. VÝSLEDKY

Funkce měniče byla testována řadou experimentů, které ověřily a zpřesnily naše předpoklady o jeho chování na tenkých deskách. V prvních experimentech byly použity dva tónové generátory a byl měněn jejich fázový rozdíl, poté byly prováděny experimenty s řídicí jednotkou osazenou signálovým procesorem TMS320C6713 s algoritmy LMS a $F-x$ LMS. Řízenou strukturou byl nejprve ocelový pásek buzený bodovou silou. Zde byl zkoušen zejména vliv pozice měniče na dosahovaný útlum akustického tlaku a výkonu. Bylo ověřeno, že při umístění měniče do kmitny vzniká v tomto místě nový uzel a útlumu je dosahováno přeuspořádáním módů. Při aktivním řízení bylo rovněž měřeno pole hladiny akustického tlaku nad zdrojem, které nám názorně umožnilo sledovat směrovou závislost útlumu tlaku.

V dalších experimentech byl využit nový zdroj, čtvercová deska buzená dopadající zvukovou vlnou. U tohoto zdroje byl testován vliv počtu sekundárních měničů a počtu nezávislých řídicích kanálů na dosahované výsledky. Tyto experimenty prokázaly, že vhodnou volbou polohy měničů je možné snížit počet řídicích kanálů (při zachování počtu měničů), což snižuje nároky na hardware a tím i cenu systému. V jednobandovém uspořádání jsme dosáhli útlumu celkového vyzářeného výkonu 8 dB s jedním sekundárním měničem, 10 dB se dvěma a 15 dB se čtyřmi. V průběhu experimentů jsme rovněž měřili pole akustického tlaku nad zdrojem, které názorně ukazuje směrovost útlumu.

S využitím laserového skenovacího vibrometru bylo možné pro optimalizaci polohy měniče využít vypočtené strukturální intenzity a její divergence (hustoty injektovaného mechanického výkonu). Výsledkem je em-

- [8] Švec, P. – Jandák, V. – Jiříček, O. – Brothánek, M.: *Studies of Capability of PZT Actuators in ASAC*, In proceedings of 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2007.
- [9] Švec, P. – Jiříček, O.: *Active Vibration Control Using Piezoelectric Transducers*, Workshop 2008, Prague.
- [10] Švec, P. – Jandák, V.: *The Influence of PZT Actuators Positioning in Active Structural Acoustic Control*. Acta Polytechnica. 2008, vol. 47, no. 4-5, p. 55–58. ISSN 1210-2709.
- [11] Jiříček, O. – Švec, P. - Jandák, V.: *Experiments with active control of sound radiation from vibrating plates*. In Proceedings of Active 2009. Washington, DC: Institute of Noise Control Engineering of the USA, 2009.
- [12] Jiříček, O. – Švec, P. – Jandák, V. – Brothánek, M.: *Active control of sound transmission using moment actuators*. In ICSV16 - The 16th International Congress on Sound and Vibration. Krakow: International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 2009, . ISBN 978-83-60716-71-7.
- [13] Švec, P. – Jandák, V. – Jiříček, O. – Brothánek, M.: *Study of capabilities of moment actuators in ASAC*, In proceedings of Inter-Noise 2010, Lisbon: Portuguese Acoustical Society, 2010, p. 1–7.
- [14] Švec, P. – Jandák, V. – Jiříček, O. – Brothánek, M.: *Active structural acoustic control of thin plate with mixed boundary conditions*, In proceedings of Inter-Noise 2011, Osaka: Acoustical Society of Japan, 2011. ISSN 0105-175X.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

- Publikace v impaktovaných časopisech
 - Patenty
 - Publikace excerptované WOS
 - Publikace v recenzovaných časopisech
- [1] Švec, P. – Jandák, V.: The Influence of PZT Actuators Positioning in Active Structural Acoustic Control, *Acta Polytechnica*, vol. 47, no. 4–5, p. 55–58, ISSN 1210-2709, ČVUT, Praha, 2008.
- Publikace ostatní
- [2] Švec, P.: *Modelování aktivního řízení vibrací*, diplomová práce, ČVUT-FEL, leden 2006.
- [3] Švec, P.: *Modeling of Active Vibration Control.*, In Poster 2006 [CD-ROM], Praha, 2006.
- [4] Švec, P. – Brothánek, M.: *Modelování aktivního prvku pro řízení vibrací a vyzařování*, Sborník 72. akustického semináře, Česká akustická společnost, květen 2006, díl 1, s. 107–114. ISBN 80-01-03489-5.
- [5] Brothánek, M. – Jandák, V. – Jiříček, O. – Švec, P.: *Návrh buňky pro aktivní řízení vyzařování a vibrací*. Sborník 73. akustického semináře. Praha: ČVUT, 2006, díl 1, s. 5–11. ISBN 80-01-03558-1.
- [6] Švec, P. – Brothánek, M. – Jandák, V. – Jiříček, O.: *Weak Radiating Cell for Active Vibration Control: First Approach*: Inter-Noise 2006 [CD-ROM]. Washington, DC: Institute of Noise Control Engineering of the USA, 2006.
- [7] Švec, P. – Jandák, V. – Jiříček, O. – Brothánek, M.: *Active Structural Acoustic Control of Thin Plate Actuated by Airborne Noise*, In proceedings of Inter-Noise 2007, Istanbul: Turkish Acoustical Society, 2007, p. in07–607.

pirické doporučení umisťovat měniče do uzlových čar, přes které protéká činný mechanický výkon od primárního zdroje.

V experimentu bylo dosaženo s novým osmiprvkovým typem měniče v optimalizované poloze útlumu hladiny akustického výkonu 13 dB v jednonálovém uspořádání při buzení na frekvencích 90 a 158 Hz současně.

5. ZÁVĚR

Využití silových momentů v aktivním řízení vyzařování je v publikacích obvykle opomíjený přístup. Přitom z našich experimentů vyplynulo, že tato koncepce je efektivní a funkční. Možným zdůvodněním je neexistence jednoduchého měniče, který působí na řízenou strukturu pouze silovým momentem. Dosud publikované měniče svou složitostí buď výrazně překonávaly dostupné silové měniče nebo vyžadovaly budičí napětí v řádu stovek voltů. Proto byl v této práci navržen, popsán a otestován nový měnič, využívající jednostranně vetknuté piezokeramické bimorfy. K napájení měniče přitom postačuje bezpečné malé napětí.

V poslední době se vývoj navrženého systému ubírá směrem k testování složitějších okrajových podmínek než je prosté podepření a vetknutí. Výsledky s aktivním řízením okrajové podmínky (momentem působícím podél okraje jedné strany desky) prokázaly správnost konceptu, a proto se jej chystáme dále rozvíjet.

V současnosti již provádíme experimenty s vícekanálovými systémy využívajícími jednotky Soft dB Zen na zdroji sestávajícím ze tří kmitajících desek uzavírajících dřevotřískovou konstrukci. V tomto experimentu jsme testovali buzení až devíti harmonickými vlnami současně při dvou řídicích kanálech. Souběžně pracujeme na návrhu tenkého a lehkého dvojitého panelu pro aktivní řízení neprůzvučnosti využívajícího momentové měniče. Tento unifikovaný panel představuje další krok vstříc reálné aplikaci celého systému.

Souběžně pracujeme na návrhu tenkého a lehkého dvojitého panelu pro aktivní řízení neprůzvučnosti využívajícího momentové měniče. Tento unifikovaný panel představuje další krok vstříc reálné aplikaci celého systému.

Seznam v tezích použité literatury

- [1] Guicking, D.: On the invention of active noise control by Paul Lueg, *J. Acoust. Soc. Am.*, (**87**), p. 2251–2254, 1990.
- [2] Elliott, S.J. – Joseph, P. – Nelson, P.A. – Johnson, M.E.: *Power output minimization and power absorption in the active control of sound*, *J. Acoust. Soc. Am.* 90(5), November 1991.
- [3] Snyder, S.D. – Tanaka, N.: *To absorb or not to absorb: Control source power output in active noise control systems*, *Journal of Acoustical Society of America*, 94(1), pp. 185–195, 1993.
- [4] Johnson, M.E. – Elliott, S.J.: *Active control of sound radiation from vibrating surfaces using arrays of discrete actuators*, *Journal of Sound and Vibration*, 207(5), pp. 743–759, 1997.
- [5] Marcotte, P. – Fuller C. R. – Cambou P.: *Control of the Noise Radiated by a Plate Using a Distributed Active Vibration Absorber (DAVA)*, *Active 99*, 1999.
- [6] Fuller, C. R. – Elliot, S. J. – Nelson, P. A.: *Active Control of Vibration*, Academic press, London, 1997.
- [7] Thomas, D.R. – Nelson, P.A. - Pinnington, R.J. - Elliott, S.J.: *An analytical investigation of the active control of the transmission of sound through plates*, *Journal of Sound and Vibration*, 181(3), pp. 515–539, 1995.
- [8] Hansen, C.H. – Snyder, S.D.: *Active Control of Noise and Vibration*, Taylor & Francis, 1997.
- [9] Snyder, S.D. – Burgan, N.C. – Tanaka, N.: *An acoustic-based modal filtering approach to sensing system design for active control of structural acoustic radiation*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(1), pp. 123–139, 2002.
- [10] Sors, T.C. – Elliott, S.J.: *Volume velocity estimation with accelerometer arrays for active structural acoustic control*, *Journal of Sound and Vibration*, 258(5), pp. 867–883, 2002.