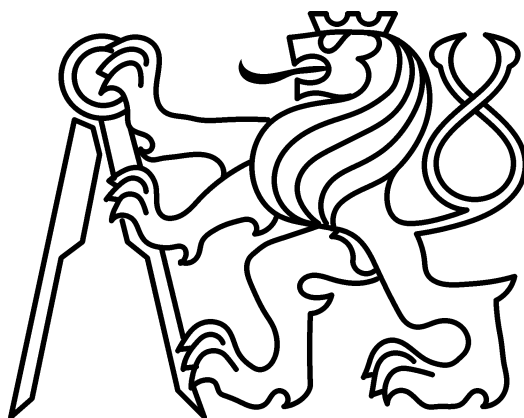


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra fyziky

Vojtěch Jandák

AKTIVNÍ SNIŽOVÁNÍ VYZAŘOVÁNÍ ZVUKU
Z VIBRUJÍCÍCH TĚLES

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Akustika

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

Praha, únor 2012

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

Uchazeč: Ing. Vojtěch Jandák
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

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Hluk již dnes doprovází člověka na každém kroku a expozice hluku se stále zvyšuje. Podobně se zvětšuje seznam prokázaných nežádoucích účinků hluku na lidské zdraví. Ve společnosti tedy logicky roste i snaha hluk minimalizovat. Nicméně prostor, ať už legislativní, či fyzikální, pro omezení hlukové zátěže je poměrně malý.

Z fyzikálního hlediska je základním přístupem snížení akustického výkonu samotného zdroje zvuku. Pokud pomineme možnosti spočívající v jeho konstrukčních změnách, je jedinou alternativou zdroj zvuku pasivně nebo aktivně zatlumit. Principy pasivního tlumení se velmi dobře dají využít na vyšších kmitočtech, na nízkých kmitočtech se často obtížněji hledá takové pasivní řešení, které by bylo pro své rozměry a hmotnost přijatelné.

Ve třicátých letech minulého století si německý fyzik GEORG HEINRICH PAUL LUEG (1898–1979) jako první nechal patentovat princip aktivního snižování hluku [1]. Zveřejnění patentu také v Americe bylo v předválečném Německu považováno za zradu, a všestranně nadaný Lueg se stal pronásledovanou osobou a nemohl dále působit jako fyzik. Během druhé světové války vystudoval medicínu, krátce ještě působil ve vojenské nemocnici, a po válce si otevřel lékařskou praxi a do konce svého života působil jako uznávaný lékař.

Dnes se standardní systémy, které využívají k potlačení nežádoucího hluku zvukové pole vyzářované ze sekundárního zdroje zvuku, většinou reproduktoru, označují zkratkou ANC (*Active Noise Control*).

Přibližně před třiceti roky se začaly objevovat první systémy, jejichž cílem bylo snížit vibrace nějaké struktury, případně nějakou strukturu aktivně izolovat. Podle typu aktuátorů můžeme rozdělit systémy AVC (*Active Vibration Control*) do dvou skupin – plně aktivní a semiaktivní. Plně aktivní aktuátory dodávají mechanickou energii přímo do vibrující struktury, a mohou tak ovlivnit vibrace daného systému. Semiaktivní aktuátory jsou v podstatě pasivním tlumením vibrací, jejich mechanické vlastnosti mohou být měněny pomocí řídicího signálu. Mezi tento typ adaptivních aktuátorů patří např. elektoreologické materiály a sloučeniny s tvarovou pamětí. AVC nachází výrazné uplatnění např. v leteckém a lodním průmyslu a ve stavebnictví. Snížení vibrací určité struktury nemusí ovšem znamenat snížení vyzářeného akustického výkonu z této struktury.

V roce 1985 uveřejnil FULLER [2] nový způsob snížení vyzařování hluku z vibrující struktury prostřednictvím měničů rozmístěných přímo na tuto strukturu. Koncepce těchto systémů vychází z výše uvedených ANC, resp. AVC a nazývá se ASAC (*Active Structural Acoustics Control*) – Aktivní snižování vyzařování zvuku. Podobně jako snížení vibrací může mít za následek nárůst vyzařování zvuku z dané struktury, tak ASAC může mít za následek zvětšení vibrací této struktury. Výzkum v této oblasti je podporován vojenským průmyslem, např. snaha o „akustickou neviditelnost“ ponorek. I v této oblasti se používají semiaktivní a plně aktivní měniče.

V článku [3] představili FULLER a JOHNSON koncept úplného pokrytí povrchu vibrujícího tělesa vrstvou aktuátorů, které nemění vibrace tohoto povrchu, ale modifikují jeho vyzařovací impedanci. Takovéto aktivní povrchy jsou jednak použitelné i na těžká a tuhá tělesa a také mohou mít i nezanedbatelný pasivní útlum.

Jedním z možných přístupů je snaha o potlačení vyzařování zvuku způsobeného pouze určitými módy kmitání dané struktury. Přičemž celkové snížení vyzařování zvuku z nějaké struktury může být dosaženo pouze prostřednictvím malé změny rozložení amplitud a fází jednotlivých módů [4]. Podobný princip může být využit pro přesunutí energie mezi jednotlivými módy takovým způsobem, abychom snížili celkový akustický výkon zdroje zvuku nebo alespoň podle potřeb pozměnili jeho směrovou charakteristiku.

V oblasti aktivního řízení vibrací a vyzařování se využívá mnoho různých typů aktuátorů, které jsou založeny zejména na piezoelektrickém, elektrodynamickém a magnetostrikčním principu. Ve specifických odvětvích průmyslu se potom používají zvláštní typy aktuátorů (např. v helikoptérách se hojně používají elektrohydraulické aktuátory). Obecně lze říci, že aktuátory, které jsou schopné generovat velké výchylky, produkují malé síly a opačně. Elektrodynamické aktuátory nacházejí v mnoha aplikacích široké uplatnění (např. v lodním průmyslu tlumení vibrací lodního šroubu), nicméně mají větší hmotnost, což je v řadě případů nežádoucí, a jsou poměrně objemné vzhledem k síle, kterou generují. Piezoelektrické a magnetostrikční aktuátory jsou v poměru ke svým fyzickým parametrům schopny generovat větší síly. V ASAC se přímo jako aktuátory, nebo jako jejich hlavní konstrukční prvek, používají piezoelektrické unimorfy, bimorfy a PVDF fólie.

Obor aktivního snižování vyzařování zvuku se rozvíjí i v dnešní době, přičemž jedna z dominantních oblastí výzkumu je zaměřena na systémy s měniči, kterým postačuje napájení v oblasti bezpečných proudů a napětí.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce bylo realizovat systém aktivního potlačení vyzařování zvuku, který by byl aplikovatelný zejména na takové primární zdroje, jejichž vyzařování zvuku má tonální charakter. Pro realizaci systému bylo nutné navrhnout a vytvořit sekundární měniče – aktuátory, sestavit a naprogramovat nebo případně podle finančních možností zakoupit vhodnou řídicí jednotku a zkonstruovat pro vývoj systému vhodné primární zdroje vyzařování zvuku.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

V prvních kapitolách disertační práce jsou shrnuty teoretické základy aktivního snižování vyzařování zvuku a uvedeny základy adaptivní filtrace a používaných strategií aktivního snižování hluku, vibrací a vyzařování zvuku, přičemž hlavní pozornost je soustředěna na ty partie, které přímo souvisí s provedenými experimenty.

Těžiště práce spočívá v popisu experimentů provedených v rámci vývoje aktivního systému snižování hluku, jehož jednou z hlavních komponent je momentový aktuátor. První experimenty byly provedeny na jednoduchých primárních zdrojích (vetknutý plechový pásek) a sloužily k ověření vlastností aktuátorů. Další experimenty byly provedeny na složitějších primárních zdrojích zvuku a byly zaměřeny kromě samotného snížení vyzařování např. na řízení neprůzvučnosti plechu. Pro experimenty byla na pracovišti vyvinuta jednokanálová řídicí jednotka. Pro vícekanálové experimenty byla později na pracovišti k dispozici tříkanálová řídicí jednotka.

Pro hodnocení realizovaných systémů byla stanovena metodika. Základním hodnotícím kritériem pro stanovení účinnosti systému a jeho možností byl akustický výkon, přičemž předpokladem pro samotné měření snížení akustického výkonu zkušebního zdroje zvuku byla dobrá stabilita aktivního systému. Dále bylo měřeno rozložení rychlosti vibrací na samotném zdroji zvuku a rozložení hladiny akustického tlaku ve vybrané

rovině nad zdrojem zvuku. Jednotlivé experimenty byly vždy zaměřeny na sledování vybraného jevu.

4. VÝSLEDKY

Náplní prvních experimentů byla měření vlastností momentového aktuátoru. Během těchto experimentů byla zároveň stanovena metodika pro nastavení a hodnocení aktivních systémů, která byla v dalších experimentech dodržována. Řídicí jednotka byla pro tyto experimenty nahrazena dvojicí tónových generátorů se vzájemně nastavitelným fázovým posuvem a jako primární zdroj byl použit tenký vetknutý plechový pásek buzený čistým tónem. Dosažené výsledky, např. snížení celkového akustického výkonu primárního zdroje přibližně o jeden řád, byly předpokladem pro použití tohoto aktuátoru i ve složitějších aplikacích a zároveň posloužily jako podklady pro optimalizaci jeho konstrukce. V navazujících experimentech byl sledován vliv počtu aktuátorů na dosažený útlum a vliv polohy chybového snímače – mikrofону na změnu směrové charakteristiky primárního zdroje zvuku.

Pro další experimenty byla zvolena strategie feedforward a jednokanálová konfigurace systému. Protože bylo průběžně ověřováno použití aktuátoru i s jinými než harmonickými signály, byl při realizaci řídicí jednotky použit řídicí algoritmus FXLMS místo řídicích algoritmů přímo zaměřených na harmonické signály. Řídicí algoritmus byl spolu s metodou MLSSA pro měření impulzových odezev chybových cest implementován do vývojové sady se signálovým procesorem TMS320C6713DSK od firmy Texas Instruments založené na aritmetice s plovoucí řádovou čárkou. Jako chybový snímač byl vždy použit mikrofon. Záměrem adaptivního systému bylo snížení celkové hladiny akustického výkonu primárního zdroje buzeného dvěma harmonickými signály. Primární zdroj byl pro tyto experimenty tvořen vetknutým plechem tvaru čtverce o straně 58 cm buzeným dopadající zvukovou vlnou. Celkovou hladinu akustického výkonu tohoto zdroje se podařilo snížit o 14 dB.

Poslední experiment byl zaměřen na aplikaci vícekanálového systému. V laboratoři byla nově k dispozici tříkanálová řídicí jednotka založená na aritmetice s pevnou řádovou čárkou a algoritmem FXLMS s normovaným konvergenčním koeficientem. Změna používané technologie si

vyžádala určitou modifikaci experimentálních postupů a zapojení, neboť oproti předešlé řídicí jednotce (aritmetika s plovoucí řádovou čárkou) bylo nezbytné věnovat větší pozornost nastavení parametrů řídicí jednotky a úrovní všech signálů, tak aby nedošlo k nevybuzení převodníků, podtečení nebo naopak přetečení při výpočtu, a zamezilo se tak ztrátě stability. Jak ukázaly provedené experimenty, byla oblast určená správným nastavením parametrů, kde 16bitová jednotka pracovala požadovaným způsobem, poměrně úzká. Stabilita adaptivního systému byla zároveň limitována např. velmi dlouhou impulzovou odezvou primárního zdroje (až 600 ms). Podstatné zlepšení experimentální činnosti naopak přineslo softwarové prostředí nové jednotky, neboť většinu parametrů, úrovně signálů, změřené impulzové odezvy apod. bylo možné sledovat za běhu programu, což u předešlé jednotky nebylo možné.

Primární zdroj použitý v posledním experimentu sestával ze dvou mechanicky neoddělených vyzařujících ploch (dřevotřísková konstrukce, podle které byl dvakrát ohnut plech) a byl buzen signálem tvořeným 9 harmonickými tóny. Při zvolené dvoukanálové konfiguraci systému s vázanými kanály se podařilo snížit hladinu akustického výkonu uvedeného primárního zdroje zvuku o 15 dB.

5. ZÁVĚR

Mohutný rozvoj aktivních systémů souvisel v devadesátých letech minulého století s rozvojem digitálních signálových procesorů. Z počátku byly aplikace aktivních systémů limitovány relativně malým dostupným výpočetním výkonem. Dnes již takováto omezení v podstatě neexistují a se systémy aktivního snižování hluku a vibrací a aktivního snižování vyzařování zvuku je možné se setkat v řadě aplikací.

Jedním z témat, která jsou u systémů aktivního snižování vyzařování zvuku stále aktuální, je vývoj takových systémů, u nichž napájení aktuátoru splňuje elektrotechnické předpisy z hlediska bezpečných napětí a proudů. Vývoj takového systému je tématem disertační práce.

V první části disertační práce jsou shrnuty základy teorie systémů aktivního snižování vyzařování zvuku, jejich řídicích algoritmů a implementací. Druhá polovina této práce je věnována popisu uskutečněných experimentů, které provázely vývoj aktivního systému snižování vyzařo-

vání zvuku a v rámci nichž se podařilo ověřit teoretické předpoklady.

Vytyčený cíl disertační práce – realizace kompletního systému pro aktivní snížení vyzařování zvuku – se podařilo splnit. Při dalším vývoji by bylo možné vyzkoušet i složitější vícekanálové varianty systému na jiných zdrojích zvuku a s jinou metodou zpracování chybových signálů. Dále by bylo možné inovovat aktuátor, např. prostřednictvím zakázkové výroby piezoelektrických bimorfů, tak aby se zvýšila jeho životnost a účinnost. Celý systém by se tak přiblížil k možné komerční aplikaci.

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] Fuller, C. R., Elliot, S. J., Nelson, P. A.: *Active Control of Vibration*, Academic press, London, 1997.
- [3] Johnson, B. D., Fuller C. R.: *Broadband control of plate radiation using a piezoelectric, double-amplifier active-skin and structural acoustic sensing*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **107**(2), p. 876–884, 1999.
- [4] Elliott, S. J., Johnson, M. E.: Radiation modes and the active control of sound power *J. Acoust. Soc. Am.*, **94**(4), p. 2194–2204, 1993.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

- Publikace v impaktovaných časopisech
- Patenty
- Publikace excerpované 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, ISSN1210-2709, ČVUT, Praha, 2008.
- Publikace ostatní
- [2] Jandák, V.: *Měření akustického výkonu v bezodrazové komoře*, diplomová práce, ČVUT FEL, Praha, 2005.
- [3] Brothánek, M., Jandák, V., Jiříček, O., Švec, P.: Návrh buňky pro aktivní řízení vyzařování a vibrací, *Sborník 73. akustického semináře*, p. 5–11, Třešť, 2006.

- [4] Švec, P., Jandák, V., Brothánek, M., Jiříček, O.: Weak radiating cell for active vibration control: First approach, *Proc. of Inter-Noise 2006*, Honolulu, 2006.
- [5] Jandák, V., Jiříček, O.: Active Control of Sound Radiation from Vibrating Bodies Using Piezoelectric Actuators, *Proc. of Workshop 2007*, ČVUT, Praha, 2007.
- [6] Švec, P., Jandák, V., Jiříček, O., Brothánek, M.: Studies of capability of PZT actuators in ASAC, *Proc. of 19th International Congress on Acoustics*, Madrid, 2007.
- [7] Švec, P., Jandák, V., Jiříček, O., Brothánek, M.: Active structural acoustic control of thin plate actuated by airborne noise, *Proc. of Inter-Noise 2007*, Istanbul, 2007.
- [8] Jiříček, O., Švec, P., Jandák, V., Brothánek, M.: Active control of sound transmission using moment actuators *Proc. of The 16th International Congress on Sound and Vibration*, Krakov, 2009.
- [9] Jiříček, O., Švec, P., Jandák, V.: Experiments with active control of sound radiation from vibrating plates, *Proc. of Active 2009*, Ottawa, 2009.
- [10] Švec, P., Jiříček, O. Jandák, V., Brothánek, M.: Study of capabilities of moment actuators in ASAC, *Proc. of Inter-Noise 2010*, Lisabon, 2010.
- [11] Jiříček, O., Koutný, A., Švec, P., Brothánek, M., Jandák, V.: Non-equidistant k-space sampling in statistically optimized near-field acoustic holography, *Proc. of Workshop 2011*, ČVUT, Praha, 2011.
- [12] Švec, P., Jandák, V., Brothánek, M., Jiříček, O.: Active structural acoustic control of thin plate with mixed boundary conditions, *Proc. of Inter-Noise 2011*, Osaka, 2011.

Seznam prací disertanta nevztahujících se k disertaci

- Publikace v impaktovaných časopisech
 - Patenty
 - Publikace excerpované WOS
 - Publikace v recenzovaných časopisech
 - Publikace ostatní
- [1] Jandák, V., Brothánek, M., Jiříček, O.: Měření parametrů bezodrazové místnosti, použití systému Pulse, *Setkání uživatelů Pulse 2004*, p. 1-9, Hrotovice, Spectris Praha, 2004.
 - [2] Jiříček, O., Brothánek, M., Jandák, V.: Hodnocení bezodrazové místnosti, *Sborník 68. akustického semináře*, p. 19–28, 2004.
 - [3] Jandák, V., Brothánek, M.: Směrové charakteristiky dvanáctistěnu, *Sborník 70. akustického semináře*, s. 61–67, Opocno, 2005.
 - [4] Brothánek, M., Jiříček, O., Jandák, V.: Zvukoměr - Akustický analyzátor, *Sborník – Otevřená věda*, Nové hrady, 2005.
 - [5] Brothánek, M., Jiříček, O., Jandák, V.: Měření akustického výkonu pomocí akustické intenzity, *Sborník – Otevřená věda*, Nové hrady, 2005.
 - [6] Jandák, V., Brothánek, M.: Měření s modelovou hlavou, *Sborník 72. akustického semináře*, p. 35-10, Sezimovo Ústí, 2006.
 - [7] Kyncl, Z., Ali Bláhová, I., Zendulka, J., Jandák, V. (10 %): Tranzientní akustická rychlost, *Sborník 72. akustického semináře*, p. 41-54, Sezimovo Ústí, 2006.
 - [8] Kyncl, Z., Ali Bláhová, I., Zadražil, O., Jandák, V. (10 %): Experiens of 1/3-octave Noise in Time Domain: Estimatiion of Uncertaity, *Proc. of ACOUSTICS High Tatras 06*, Štrbské Pleso, 2006.

- [9] Jiříček, O., Švec, P., Jandák, V., Brothánek, M.: Comparison of sound absorption measurement methods, *Proc. of Inter-Noise 2009*, Ottawa, 2009.
- [10] Jandák, V., Švec, P., Jiříček, O., Brothánek, M.: In situ sound absorption measurement in car interior, *Proc. of Euronoise 2009*, Edinburgh, 2009.

Podíl autorů je u všech publikací, vyjma publikací [7] a [8] ze seznamu publikací nevztahujících se k disertaci, kde je podíl disertanta pouze 10 %, 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

SUMMARY

The ASAC (*Active Structural Acoustics Control*) approach is the method for reducing overall sound radiation from primary structures. It is based on actuators applied directly to the structure. These actuators change the vibration distribution in order to reduce overall sound radiation.

This thesis deals with practical applications of ASAC systems. New type of actuator was developed for a few series of experiments. The actuator consists of two bending piezoelectric strips clamped in a metal frame. As the stripes oscillate, the line moment reveals at the clamped end of the stripe. The main advantage of our actuator is low voltage (safety) supply.

In our first experiments, a baffled steel plate was used as a primary source. The plate was excited either by point force or by incident sound wave. These experiments were focused to attenuation of single radiation mode of the plate. The effect of the actuator's and error sensor's positions were studied with regard to the structural vibrations pattern and radiated sound field. The total radiated power was measured. The measurements demonstrated that line moment actuators can be effectively used in ASAC systems.

In the next series of experiments, feed-forward systems with FXLMS control algorithm was realized. As a control unit was programmed development kit TMS320C6713DSK (Texas Instruments) with standard audio codec. The system was able to reduce total sound power level of two dominant radiation modes of primary structure (baffled plate) up to 14 dB. The system was performed as a system for transmission loss control (reference microphone inside baffle).

In the last series of experiments, multichannel system (two coupled channels) was tested. The main component of a new primary source were two mechanically coupled plates. New multichannel control unit was available for the test. Our ASAC system were able to reduce total sound power level of nine dominant radiation modes of primary source up to 15 dB.

RESUMÉ

Systémy aktivního snižování vyzařování zvuku (ASAC) jsou zaměřeny na snížení celkového vyzařování zvuku z primárního zdroje. Základem těchto systémů jsou aktuátory, které se připevňují přímo na povrch primárního zdroje zvuku. Tyto aktuátory mění rozložení vibrací takovým způsobem, aby se snížilo celkové vyzařování zvuku z primárního zdroje.

Tématem této práce jsou realizace systému ASAC. Pro řadu experimentů byl vyvinut nový typ aktuátoru, který sestává z ohybově kmitajících piezoelektrických pásků uchycených v kovovém rámu. Při kmitání těchto pásků působí na jejich pevném konci moment síly. Hlavní výhodou těchto aktuátorů je jejich napájení v oblasti nízkých (bezpečných) napětí a proudů.

V prvních experimentech byl jako primární zdroj použit vetknutý plech. Tento plech byl buzen buď bodovou silou, nebo dopadající zvukovou vlnou. Tyto experimenty byly zaměřeny na potlačení jednoho módu vyzařování. V rámci experimentů byl zkoumán vliv polohy aktuátoru a chybového snímače na dosažený útlum a zároveň bylo měřeno rozložení vibrací na primárním zdroji a rozložení akustického tlaku v okolí primárního zdroje. Měření prokázala, že lze momentové aktuátory v systémech ASAC efektivně používat.

Pro další experimenty byl realizován feedforward systém s řídicím algoritmem FXLMS. Jako řídicí jednotka byla naprogramována vývojová sada TMS320C6713DSK (Texas Instruments) se standardním audio kodekem. Systémem se podařilo snížit hladinu celkového akustického výkonu dvou dominantních módů plechu o 14 dB. Systém byl navržen jako systém pro aktivní řízení neprůzvučnosti.

V závěrečných experimentech byl testován vícekanálový systém (dva vázané kanály). Hlavní komponentou nového primárního zdroje byly dva mechanicky vázané plechy. Pro měření byla k dispozici nová vícekanálová řídicí jednotka. Systémem se podařilo snížit hladinu celkového akustického výkonu devíti dominantních módů primárního zdroje až o 15 dB.