

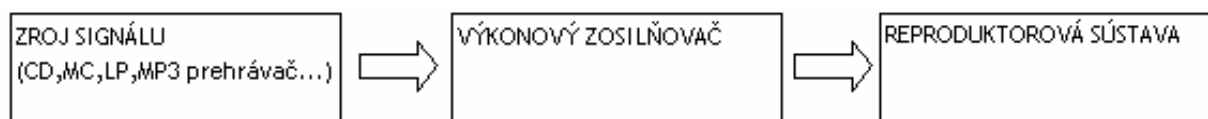
## FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN LOUDSPEAKER SYSTEM

V. Dániel<sup>1</sup>, S. Košúth<sup>2</sup>

**Summary:** *At the loudspeaker system designing, especially for bass zone, many things have to be taken into account. First it is the loudspeaker, secondary the loudspeaker's baffle board. For the loudspeaker ARA 390 00/8 the project of the subwoofer was done in terms of TS parameters by using computational simulation for the resonance frequency 40 Hz of the bass reflex. In the ANSYS program the corresponding model of the sound reproducer, the bass reflex cabinet and the surrounding air volume was done. The transient analysis was computed. The oscillation of the loudspeaker membrane by constant amplitude and frequency was simulated. The implementation of the fluid-structure interface allowed the structural vibration transformation to acoustic pressure in the air. The acoustic wave spread in the internal air volume and vibrates by the sides. Thus the secondary resonators occurred on the surrounding surfaces.*

### 1. Úvod

Většina současného produkovaného audiovizuálního umění se k člověku dostává reprodukcí v podobě zvuku. I na živých vystoupeních a koncertech je lidský hlas a zvuk mnohých hudebních nástrojů zesilován a upravován elektrickou cestou. Pro dosažení dostatečné hladiny hlasitosti a srozumitelnosti reprodukcí zvuku pro všechny posluchače se používá reprodukční akustický řetězec (Obr.1). Jeho posledním prvkem je reproduktorová soustava, která se skládá z elektroakustického měniče – reproduktoru a ozvučnice (Obr.4).



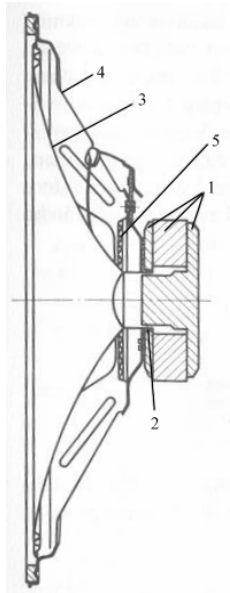
Obr.1 Reprodukční řetězec

Použitý reproduktor ARA 390 00/8 je elektrodynamický reproduktor (Obr.2), jehož membrána je s vnějším prostředím přímo spojena bez pomocných akustických prvků -

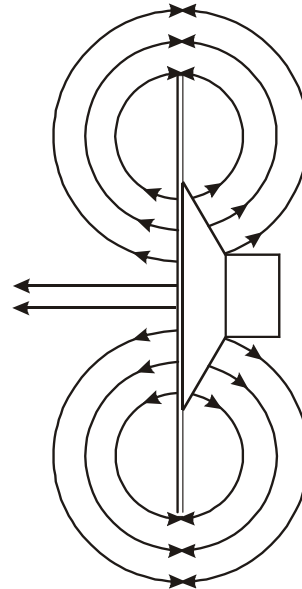
<sup>1</sup> Ing. Vladimír Dániel: Department of Wood Science, Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University of Agriculture and Forestry in Brno, Czech Republic, Zemědělská 3, 613 00, Brno, e-mail: vlada.son@seznam.cz

<sup>2</sup> Ing. Stanislav Košúth, Department of Physics Electrotechnics and Applied Mechanics, Faculty of Wood sciences and technology, Technical university in Zvolen, Slovak Republic, Masarykova 24, 960 53, Zvolen, e-mail: stanokosuth@yahoo.com

zvukovodu. Zvuk v reproduktoru je vytvářený pístovým pohybem membrány. Vlivem tohoto pohybu vzniká periodické zhuštění a zředění vzduchu v jejím okolí, a k tvorbě akustických vln. Přední plocha membrány vytváří vlny s opačnou fází oproti vlnám tvořeným zadní plochou. V případě, že je vlnová délka zvuku větší než rozměry reproduktoru, dochází k interferenci, konkrétně k vzájemnému odečítání akustických vln teda k „akustickému zkratu“ (Obr.3).



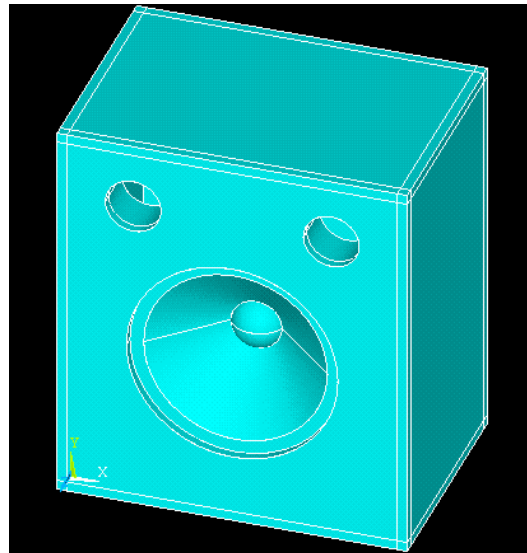
Obr. 2 Části reproduktoru



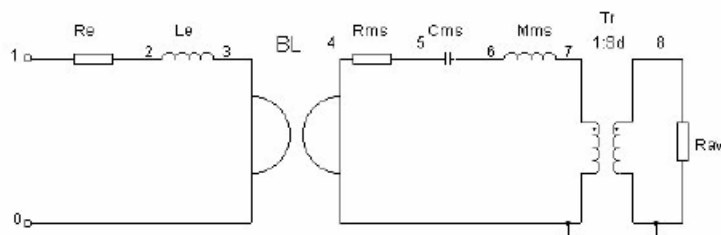
Obr. 3 Princip vzniku akustického zkratu

1. Magnetický obvod
2. Kmitací cívka reproduktoru
3. Membrána
4. Koš reproduktoru
5. Středící prvek

Obr. 4 Reproduktorová soustava – subwoofer



Pro účinné vyzáření zvuku s nízkou frekvencí je proto potřebné prostor přední a zadní plochy membrány od sebe oddělit. K tomuto účelu slouží ozvučnice. Pro daný typ reproduktoru (ARA 390 00/8) podle jeho TS (Thiele - Small) parametrů a jeho náhradního schématu (Obr.5) byl počítačovým programem Eminence designer vypočtený objem  $160 \text{ dm}^3$  pro typ ozvučnice bassreflex s laděním na 40 Hz.



Obr. 5 Náhradí elektro-mechanicko-akustické analogové schéma reproduktoru

Při vyzářování akustického signálu působí na ozvučnici značné tlakové síly proměnného směru. Tyto síly mohou způsobovat nadměrné rozechvívání stěn, které se stávají sekundárními zdroji zvuku. Tento jev je nežádoucí, protože způsobuje tzv. nelineární zkreslení frekvenčně amplitudové charakteristiky reprosoustavy. Často se setkáváme s měřením a modely nelineárního zkreslení u reproduktoru ve vzduchu (Petyt, 1998; Cobiانchi 2005). Tyto práce se věnují možným deformacím reproduktorové membrány a vlivu na vyzářovací charakteristiku reproduktoru. Kromě těchto dějů má významný vliv i zkreslení od reproduktorové skříně popsané v této práci.

## 2. Metodika

Model reproduktorové soustavy byl vytvořený pomocí programovacího jazyka APDL - ANSYS Parametric Design Language, který umožňuje plnou parametrizaci modelu. Celkový model je tak vytvořený ve formě maker, které na sebe navazují a tvoří funkční celek.

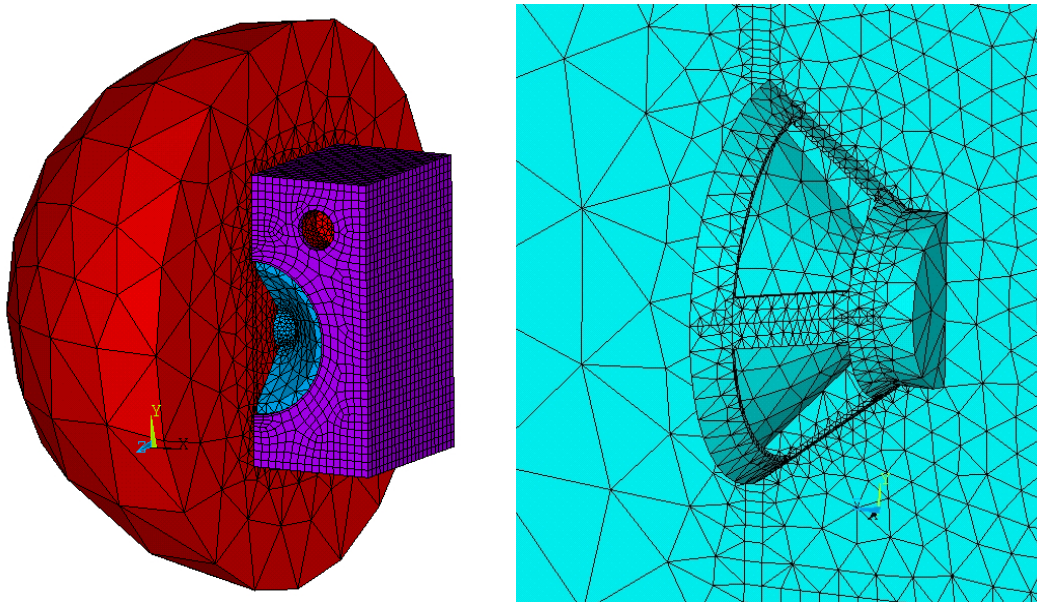
V transienční analýze používáme pro jednotlivé materiály tlumení – konkrétně koeficient  $\beta$  z rovnice 1 (ANSYS Theory reference):

$$[C] = \alpha[M] + (\beta + \beta_c)[K] + \sum_{j=1}^{N_m} \left[ \left( \beta_j^m + \frac{2}{\Omega} \beta_j^{\xi} \right) [K_j] \right] + \sum_{k=1}^{N_g} [C_k] + [C_{\xi}] \quad (1)$$

kde:  $[M]$  = hmotová matice  
 $[C]$  = matice tlumení  
 $[K]$  = globální matice elasticity  
ostatní členy jsou pro daný případ nulové

Toto tlumení se pro výpočet zahrne do matice poddajnosti  $[C]$ . Všechna tlumení z literatury je tak nutné převést na damping ratio -  $\xi$ , jemuž odpovídá právě hodnotě  $\beta$ .

Při MKP modelech je důležitá volba velikosti sítě, i velikost okolního prostoru (Cobiانchi 2005). Pomocí nekonečné roviny, která ukončuje kuloplochu vzduch, získáme bezdozvukový prostor při minimálním počtu elementů. Nevýhodou zůstává, že za touto hranicí již nezískáme žádné výsledky. Popisovaný model reproduktorové skříně je umístěn ve vzduchu otvaru koule o poloměru 1m a na jeho hranici je vytvořena pomocí elementu FLUID130 akusticky nekonečná plocha. V této vrstvě se tlak na hraně přepočte podle vzdálenosti od středu, s ohledem na nulový tlak v nekonečnu.



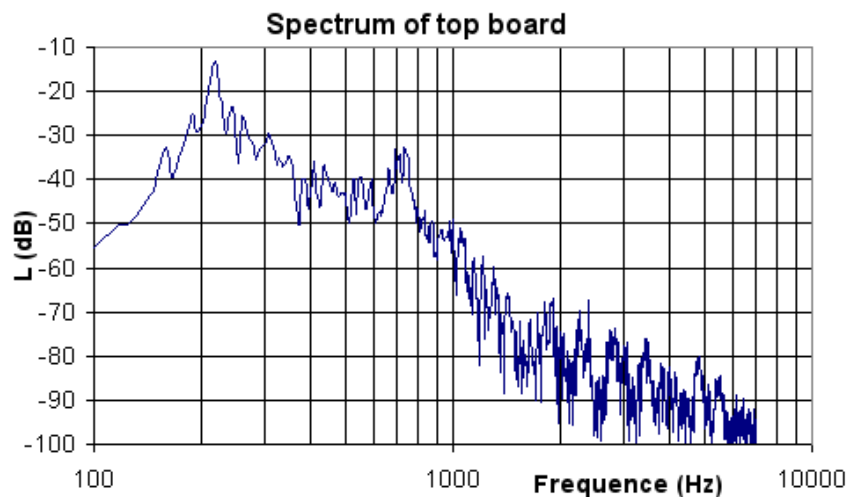
Obr. 6 Konečněprvkový model: reproduktorová soustava (vlevo), reproduktor s membránou (vpravo)

Vzduch uvnitř a v okolí reproduktorové skříně je vytvořen pomocí elementu FLUID30. Platí zde akustická vlnová rovnice - 2 (ANSYS Theory reference):

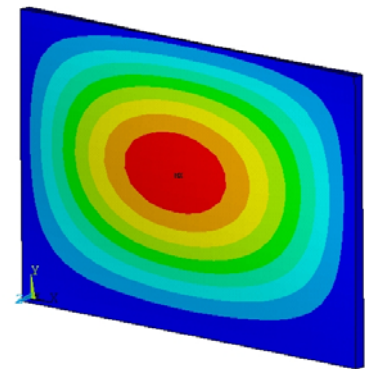
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

kde: P = tlak  
 c = rychlost šíření zvuku ve vzduchu (340 ms<sup>-1</sup>)  
 t = čas

Jako materiál reproduktorové skříně byla použita stavební borovicová 13ti-vrstvá překližka. Pro model byl použit element SOLID46. Tento 3D 8uzlý typ elementu umožňuje modelování až 250 vrstevných materiálů pomocí reálných konstant. Pro PDP BO (borovicová překližka 0°, 90°, 0°) byl vytvořený materiálový lineárně vrstvený model ortotropní borovice (Bucur, 1995). Síťování bylo pomocí šestistěnnů, výhodou je pouze 1 element na celou tloušťku desky. Model byl verifikovaný pomocí experimentu. Deska z borovicové překližky ve tvaru dna ozvučnice byla upevněny do ocelového rámu. Tím bylo realizováno její obvodové vetknutí podobné zabudování v ozvučnici. Byl vybuzen kruhový mód pomocí reproduktoru a sinus signálu. Tvar módu a stav rezonance byl detekovaný posypem prášku na povrchu desky. Kontrola experimentu byla realizována poklepem pomocí kladívka. Frekvenční odezva impulzního buzení byla zaznamenána měřícím mikrofonom a vyhodnocena audioanalyzátozem AudaCity (Obr.7). Oběma způsoby byly naměřeny stejné rezonanční frekvence 217 Hz. Modální analýzou byla vypočtena rezonanční frekvence 207 Hz (Obr.8), co je odchylka 4,6 %. Z audiosignálu poklepu byl vypočten logaritmický dekrement útlumu o velikosti 0,12 ( $\xi = 0,0191$ ).



Obr. 7 Spektrum impulzního signálu



Obr. 8 Verifikovaný FEM model

Reproduktor byl síťovaný 3D elemente, typu SOLID45. Materiálem je hliník loss factor =0,001 (Cobianchi, 2005). Jelikož celý reproduktor má mnohem složitější geometrii, bylo použito zjednodušení. Chybějící hmota byla dodána v místě těžiště cívky reproduktoru bodovým elementem MASS166.

Tlumení membrány reproduktoru je závislé také na frekvenci, kterou kmitá. Podle měření (Skrodzka, 2000) při frekvenci 84 Hz je modal damping 44,42 % ( $\xi = 0,22$ ), při 537 Hz již 6,38 %, při frekvenci 2,95 kHz 6,06 %. Velikost tlumení se samozřejmě změní po instalaci reproduktoru do reproduktorové skříně. Tato změna vlastního tlumení je především způsobena vlastními tvary reproduktorové membrány. Pro model membrány byl použit 2D typ elementu SHELL63. V oblasti ukotvení membrány do reproduktorového koše je membrána geometriky zjednodušena. Materiálové vlastnosti odpovídají papíru (tloušťka 1mm).

Basreflexové nátrubky, byly vytvořeny jako 2D trubky typem elementu SHELL63. Tloušťka stěny je 2mm, použitý materiál PS, loss factor = 0,06 ( $\xi = 0,03$ ) (Cobianchi, 2005).

V místech styku vzduchu s reproduktorovou soustavou dochází k přepočtu z posunutí na tlak a obráceně pomocí Fluid-Structure interface (ANSYS Theory reference). Matematicky zde platí rovnice 3.

$$[M_e]\{\ddot{u}_e\} + [C_e]\{\dot{u}_e\} + [K_e]\{u_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{Pr}\} \quad (3)$$

kde

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_S \{N'\} P \{n\} d(S) \quad (4)$$

kde:

- $\{\ddot{u}\}$  = vektor zrychlení
- $\{\dot{u}\}$  = vektor rychlosti
- $\{u\}$  = vektor posunutí
- $\{F^a\}$  = výsledný vektor deformace
- $\{N'\}$  = tvarová funkce
- $\{n\}$  = normála k povrchu

Toto rozhraní je tedy použito po celém vnějším i vnitřním obvodu skříně, v místě bassreflexu na obou jeho plochách, na membráně reproduktoru vně i uvnitř. Dále na samotném reproduktoru a to na všech jeho vnějších plochách kromě plochy styku s reproduktorovou skříní.

Celý model reproduktorové soustavy byl ukotvený v 4 bodech v rozích spodní steny.

Budící posunutí ve směru osy z je zadáno ve tvaru rovnice 5.

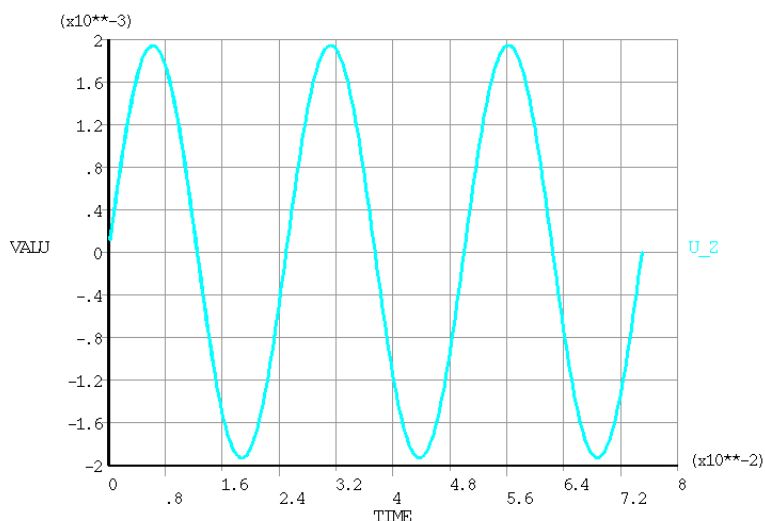
$$z = 2e-3*\sin(251.33*\{TIME\}) \quad (5)$$

Toto buzení odpovídá kmitání membrány reproduktoru při signálu o výkonu 150 W, což odpovídá jeho trvalé maximu.

Celá simulace trvala 0,075 sekund – to odpovídá 3 periodám membrány při frekvenci 40 Hz. Výpočtový krok byl zvolen na 0,00025 sekund. Bylo tak vypočteno 300 po sobě následujících výsledků.

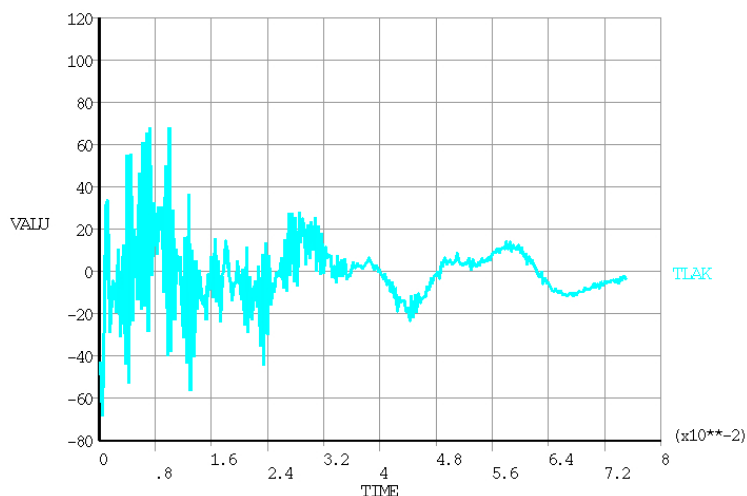
### 3. Výsledky a diskuze

Jedním z výstupů je graf posunutí libovolného uzlu přes všechna řešení, tedy v čase. Pro kontrolu můžeme tento graf zobrazit i pro budící posunutí (Obr. 9).



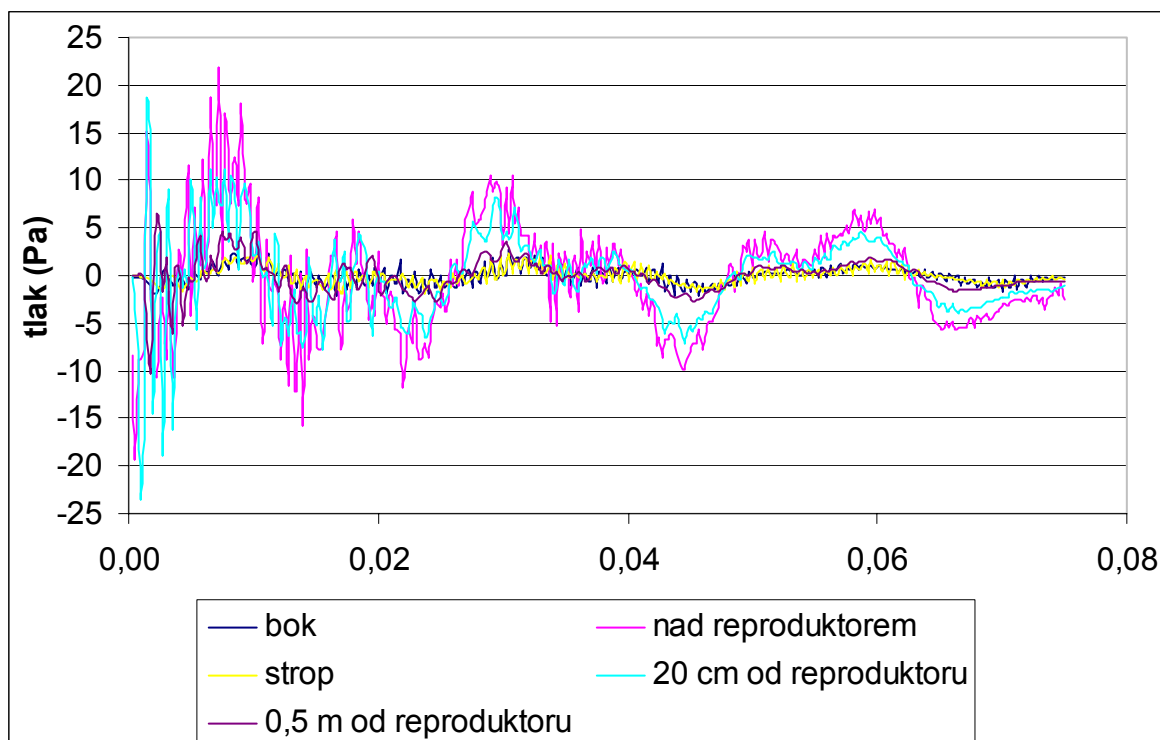
Obr. 9 Graf závislosti posunutí na čase středu membrány reproduktoru

Tento impuls je v každém výpočtovém kroku přepočten do tlaku ve fluid elementech přiléhajících k membráně reproduktoru. Ve vzdálenosti 1 cm je pak velikost tlaku patrná z obrázku 10.



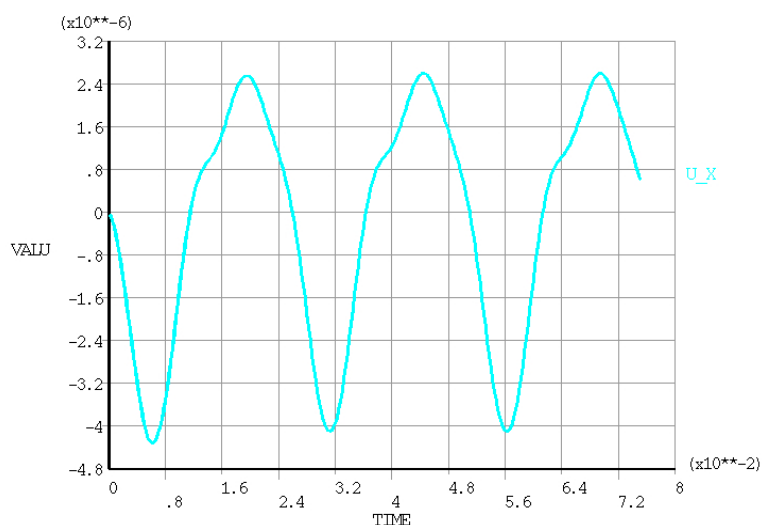
Obr. 10 Graf závislosti tlaku vzduchu na čase v místě vzdáleném 1 cm od membrány reproduktoru (hodnota 0 odpovídá atmosferickému tlaku  $10^5$  Pa)

Na začátku buzení dochází k velkým tlakovým výkyvům, které se vyrovnají přibližně po 2 periodách. Charakter změny tlaku má nadále částečně sinusový průběh.



Obr. 11 Vypočtený tlak v různých místech v okolí reproduktorové skříně

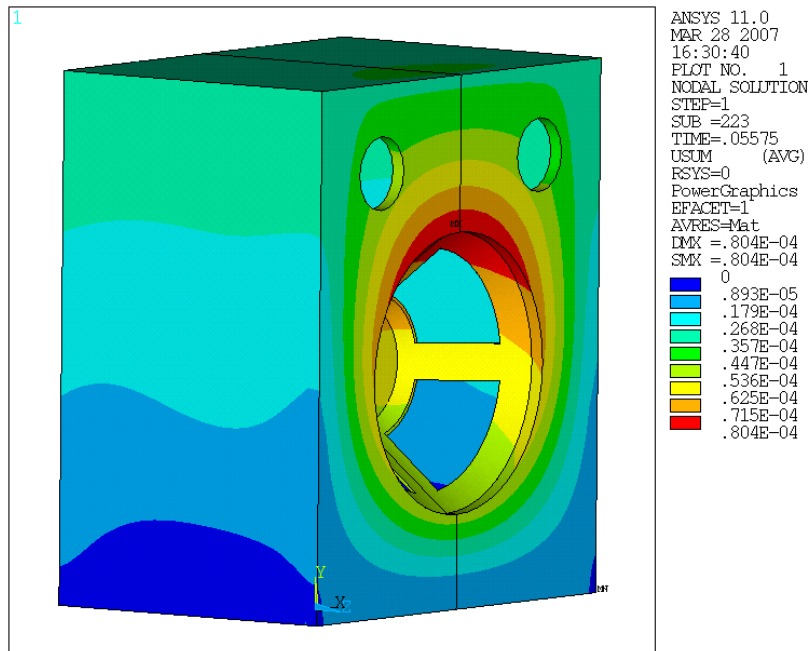
Z obrázku 11 můžeme vypočítat hladinu akustické intenzity. Počítáme pro třetí periodu – předpokládáme tak nadále ustálené chování. Pro místo 1 cm vzdálené od pravé boční stěny (*bok*) vyšla hodnota 88,47 dB, pro místo s největší amplitudou (1 cm od místa těsně nad reproduktorem v ose reproduktorové skříně (*nad reproduktorem*)) vyšla hodnota 104,55 dB (Obr. 13), pro místo 1 cm vzdálené od stropní desky (*strop*) vyšla hodnota 88,91 dB, pro místo 20 cm vzdálené od středu membrány reproduktoru v jeho ose (*bok*) vyšla hodnota 101,1 dB a ve vzdálenosti 0,5 m vyšla hodnota 93,39 dB. Rozdíl mezi kmitáním bočních nevytuzených stěn a akustickým signálem z reproduktoru je cca 16 dB. Absolutně to tedy znamená, že zvuk vznikající na jednotlivých stěnách je 24krát menší než zvuk přicházející od reproduktoru.



Obr. 12 Graf závislosti posunutí na čase středu boční stěny reproduktorové skříně

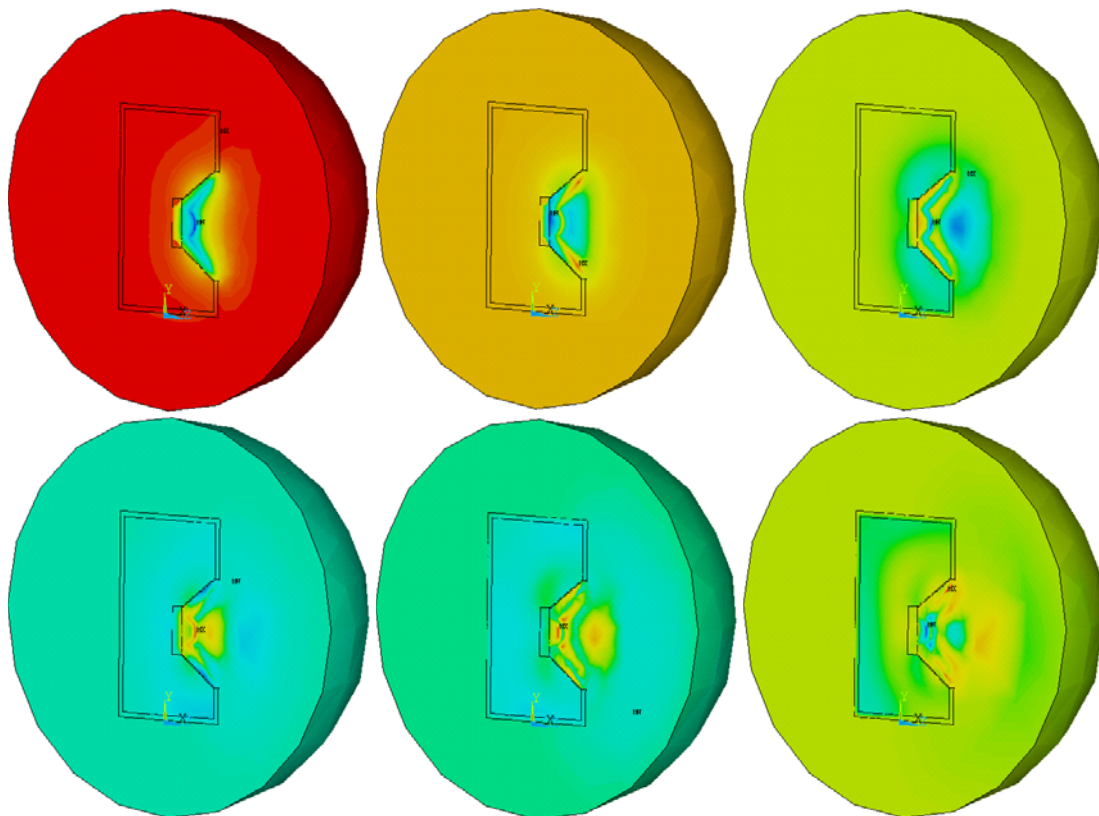


Na zkreslení zvukového signálu se podílí i fázový posun jednotlivých zdrojů zvuku. Pokud jsou v daném místě v protifázi (Obr. 12) dochází k vzájemnému odečítání amplitud.



Obr. 13 Suma posunutí v čase 0,05575 s

Maximální amplituda reproduktorové skříně jev místě těsně nad reproduktorem (Obr. 13). Velikost vznikajícího šumu je dokonce tak velký, jako zvuk přicházející od reproduktoru ve vzdálenosti 20 cm. Tento nežádoucí jev se nejčastěji odstraňuje pomocí vnitřní příčky (Sýkora 1997, Svoboda 1983). Její použití u tohoto typu skříně je nezbytné. postupné šíření zvuku můžeme vidět na sekvenci obrázků – Obr. 14.



Obr. 14 Šíření tlakové vlny – prvních 6 kroků



#### 4. Závěr

Simulace šíření zvuku se současnou interakcí s reproduktorovou soustavou přináší několik druhů výsledků. Samotný postup tlakových vln, záznam tlaku v kterémkoliv uzlu modelu, nebo posunutí kteréhokoliv uzlu konstrukce. Posunutí vypovídá o absolutní hodnotě kmitání a o fázovém posunu oproti budící síle. Ze záznamu tlaku v čase můžeme vypočítat hladinu akustického tlaku v dB. Největší hladina akustického tlaku způsobená konstrukcí (104,55 dB) je při 40 Hz v místě těsně nad reproduktorem. Toto kmitání je nutné odstranit konstrukční úpravou pomocí vnitřní příčky. Hladina akustického tlaku u bočních stěn, nebo u stropu je o 16 dB menší oproti místu před reproduktorem.

#### 5. Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu GAČR 526/03/H036 a VEGA 1/2063/05 s podporou Grantové agentury MŠ SR. Poděkování též patří firmě DANacoustic z Nových Zámků - Slovenská republika za pomoc při návrhu reprosoustavy pomocí softwaru EM Designer.

#### 6. Literatura

*ANSYS Theory reference*, manuál k programu 001099.SAS IP, Inc.

Bucur, V., (1995) *Acoustics of wood*, CRC Press, Inc., Florida

Cobianchi M., (2005), High frequency loudspeakers vibro-acoustic modeling, *Italian Multiphysics Meeting 2005*, Milan 11-10-2005

Petyt M., Gélat P. N., (1998), Vibration of Loudspeaker Cones Using the Dynamic Stiffness Method, *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 4, pp. 313-332

Skrodzka E. B., Sek A. P., (2000), Comparison of modal parameters of loudspeakers in different working conditions, *Applied Acoustics* 60, pp. 267-277

Svoboda, L. – Štefan, M., (1983) *Reproduktory a reproduktorové soustavy*, SNTL Praha

Sýkora, B. *Stavíme reproduktorové soustavy*, *A Radio*, č.10/1997 – 3/2001