



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**MODELOVÁNÍ ÚČINNOSTI PROTIHLUKOVÝCH SILNIČNÍCH
BARIÉR METODOU HRANIČNÍCH PRVKŮ**

Pavel ŘÍMAN •

***Summary:** The primary mechanism for traffic noise reduction in existing highways is through the use of noise barriers. The most of present used methods calculating noise barriers efficiency are based on approximate analytical calculations developed by use of the geometrical theory of diffraction. In these methods is difficult involve influence of diffracted and reflected sound waves, use complicated geometrical configuration, absorbent materials etc. For this reason is often not possible to get correct results. The main purpose of this article is to show possibilities of numerical modelling by Boundary Element Method (BEM) for calculating the sound pressure around noise barriers of arbitrary geometry involving complicated barrier geometry and absorbent materials.*

***Key words:** traffic noise, traffic noise barriers, Boundary Element Method*

1. Úvod

Dopravní hluk je nejvýraznějším zdrojem hluku ve venkovním životním prostředí. Z tohoto důvodu se již při projekci nových dopravních komunikací věnuje velká pozornost ochraně před dopravním hlukem. Nejčastějším prostředkem sloužícím ke snižování dopravního hluku v nejvíce exponovaných lokalitách bývají protihlukové silniční bariéry. Instalací protihlukových silničních bariér předchází predikce jejich účinnosti, která by měla zaručit účelnost bariéry. V současné době se predikce účinnosti provádí pomocí výpočetních modelů založených převážně na empirických vzorcích. Základní vztahy pro šíření zvuku ve vnějším prostředí explicitně zahrnují vliv vlnové divergence, směrovosti zdroje a vliv velkých ploch v blízkosti zdroje. Tyto vztahy popisují šíření zvuku od zdroje hluku k vyšetřovanému místu – přijímači. Aby byl tento vztah schopen poskytovat výsledky odpovídající reálným hodnotám, je potřeba zavádět korekce eliminující vliv relevantních mechanismů ovlivňujících šíření hluku od zdroje k přijímači. Protože u instalovaných protihlukových bariér se předpokládá velký vložný útlum, jsou hlavním zdrojem hluku za bariérou zvukové vlny šířící se přes horní hranu bariéry. Z tohoto důvodu má na šíření hluku za bariérou zásadní vliv geometrická konfigurace bariéry (popř. bariér), akustické vlastnosti materiálu bariéry, interakce s okolím a reflexní a absorpční prvky na hranách bariér. Dalším faktorem výrazně

• Ing. Pavel Říman, Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, Technická 2, Brno, 616 69,
tel. 0728/825 694, e-mail: ríman@kn.vutbr.cz

ovlivňujícím účinnost protihlukových bariér jsou interferenční jevy. Zejména při instalaci paralelních bariér může dojít v postižené oblasti dokonce ke zvýšení hlučnosti. Postihnout tyto faktory pomocí empirických vzorců je velice náročné a výpočet vyžaduje zavedení množství korekcí, jejichž platnost je omezena na jednoduché geometrické konfigurace bariér a okolí. Tento příspěvek analyzuje možnosti výpočtového modelování účinnosti protihlukových silničních bariér metodou hraničních prvků s ohledem na geometrii bariéry i akustické vlastnosti prostředí. Byly provedeny výpočty na modelech s různou geometrií jednoduchých i paralelních bariér. Dále byl analyzován vliv tvaru a akustických vlastností materiálu bariér a přilehlých ploch na rozložení hladin akustického tlaku v okolí bariér.

2. Akustická analýza pomocí MHP

2.1. Formulace problému

Při výpočtu účinnosti protihlukových silničních bariér můžeme pomocí metody hraničních prvků modelovat v podstatě libovolnou geometrickou konfiguraci problému, tzn. jednoduché i paralelní bariéry složitých tvarů včetně akustických vlastností okolí i materiálů použitých na stavbu bariéry. Metoda hraničních prvků bohužel neumožňuje z hlediska velké výpočetní náročnosti postihnout i interakci zvukových vln s okolní krajinou. Tato interakce však v mnoha případech ovlivňuje šíření hluku v okolí bariér. Z tohoto důvodu byly modely koncipovány tak, aby bylo možno postihnout interferenční a difrakční jevy pouze v blízkém okolí bariér a výsledky byly snadno použitelné například pro paprskovou metodu, která umožňuje výpočty na modelech větší velikosti, ale není schopna postihnout násobnou difrakci.

Vzhledem k povaze řešené úlohy byla pro výpočet použita přímá kolokační metoda hraničních prvků pro vnější akustický prostor. Tato metoda vyplývá z použití Helmholtzova hraničního integrálu. Neznámými v úloze jsou tlaky a normálové rychlosti na rozhraní, které mohou být dále použity přímo pro výpočet tlaků a rychlostí částic ve vnějším akustickém systému. Tato metoda respektuje při použití konečnoprvkového modelu interakci mezi fluidním prostředím a strukturními vibracemi. Řešení vlnové rovnice je zjednodušeno zavedením bodového akustického zdroje a odpovídající Greenovy funkce. Bodový zdroj je definován jako pulzující koule s konečným zdrojovým výkonem a o poloměru r . Intenzita akustického zdroje je definována vztahem

$$q = \rho S \bar{v} \quad (1)$$

kde: ρ – hustota fluida

S – povrch koule

$\bar{v}$ - střední rychlost kmitajícího povrchu

Akustické pole v okolí zdroje musí splňovat Helmholtzovu rovnici. Jestliže poloha zdroje v akustickém prostoru $\mathbf{V}$ je v bodě $\mathbf{Y}$, pak proměnné akustické pole musí vyhovovat rovnici

$$\nabla^2 p + k^2 = -q \cdot \delta(\mathbf{X} - \mathbf{Y}) \quad (2)$$

kde $\delta(\mathbf{X} - \mathbf{Y})$ je 3D Diracova funkce.

Akustický tlak v bodě $\mathbf{X}$ prostoru vyhovující rovnici (2) je dán vztahem

$$p(X, Y) = q \frac{e^{-jkr(X, Y)}}{4\pi r(X, Y)} \quad (3)$$

kde $r(X, Y)$ je vzdálenost mezi bodem X a zdrojem. Greenova funkce je definována vztahem

$$G(X, Y) = \frac{e^{-jkr(X, Y)}}{4\pi r(X, Y)} \quad (4)$$

Vztah mezi akustickým tlakem $\mathbf{p}(\mathbf{X})$ v libovolném bodě $\mathbf{X}$ v prostoru $\mathbf{V}$ a hodnotou tlaku $\mathbf{p}(\mathbf{Y})$ a příslušného tlakového gradientu na povrchu $\mathbf{S}$ struktury je vyjádřen Helmholtzovým integrálem ve tvaru

$$p(X) = \int_S [p(Y) \partial_n G(X, Y) - G(X, Y) \partial_n p(Y)] dS(Y) \quad (5)$$

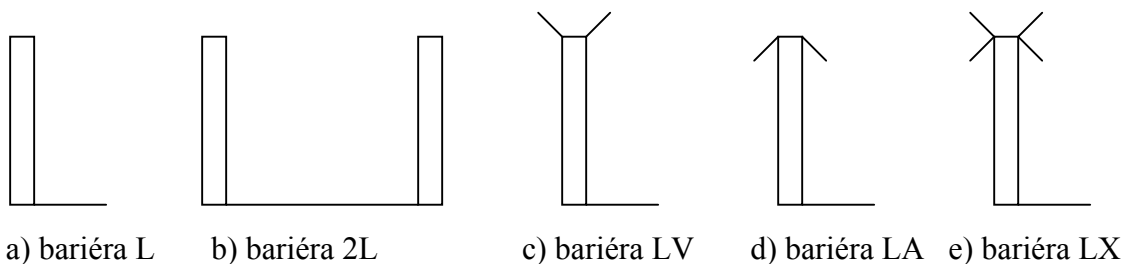
kde symbol ∂_n představuje parciální derivaci příslušné proměnné ve směru vnější normály k povrchu $\mathbf{S}$.

Pokud jsou tedy známy proměnné na povrchu např. struktury nebo povrchu akustického subsystemu, pak je možno při použití vztahu (5) vyhodnotit akustické veličiny v libovolném bodě prostoru $\mathbf{V}$.

Pro řešení úloh byl použit programový systém SYSNOISE 5.5 firmy LMS Numerical Technologies, Leuven, Belgie.

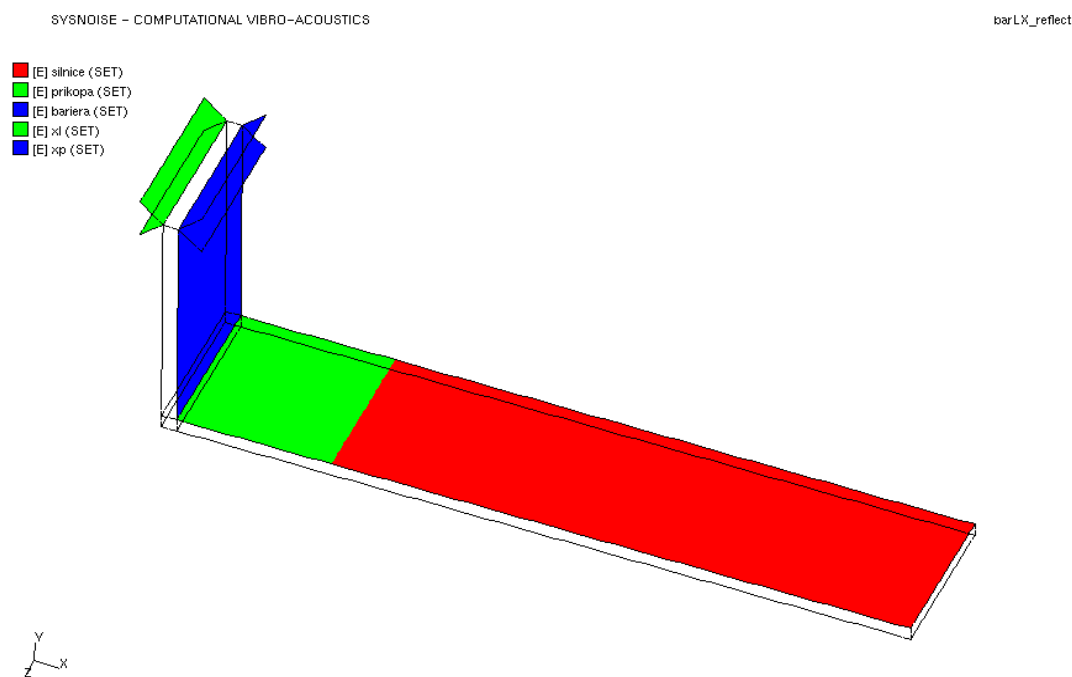
2.2. Tvorba modelu

Konečnoprvkové modely bariér byly vytvořeny v programovém systému ANSYS. Pro tvorbu sítě byly použity čtyřuzlové prvky SHELL63, které byly programovým systémem SYSNOISE převedeny na prvky QUAD4. Výpočty byly provedeny na čtyřech různých modelech s různou geometrií bariéry. Základní model je jednoduchá přímá bariéra bez difrakčního prvku na hraně a to jak jednostranná tak oboustranná. Dále byl proveden výpočet na jednostranných přímých bariérách s difrakčními prvky ve tvarech V, A a X. Tvary modelů bariér jsou schematicky znázorněny na obr. 1.



Obr.1. Schematické znázornění profilů bariér použitých při výpočtu.

U všech modelů byly na plochách reprezentující různé materiály nadefinovány odpovídající materiálové a akustické vlastnosti. Tyto plochy jsou znázorněny na obr. 2. u modelu bariéry s difrakčními prvky ve tvaru X. Konkrétní hodnoty materiálových a akustických vlastností jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce 1.



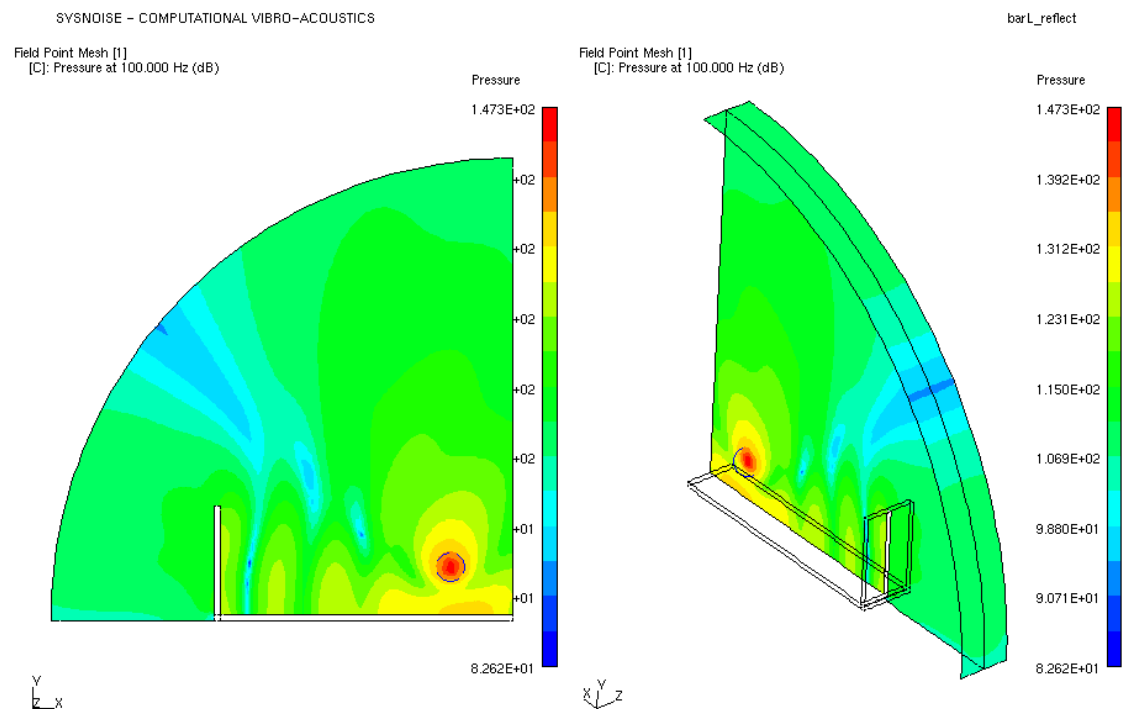
Obr.2. Plochy s různými materiálovými vlastnostmi.

<i>Materiál</i>	<i>Hustota</i> ρ [kg/m ³]	<i>Modul pružnosti</i> E [Pa]	<i>Rychlost zvuku</i> c_L [m/s]	<i>Akustická impedance</i> Z [Ns/m ³]
<i>Beton</i>	2300	$2,2 \cdot 10^{10}$	3100	$7,1 \cdot 10^6$
<i>Cihly</i>	1150	$1,6 \cdot 10^{10}$	2800	$5,6 \cdot 10^6$
<i>Travnatý porost</i>	900			$6,3 \cdot 10^4$
<i>Ocel</i>	7850	$2,6 \cdot 10^{11}$	5750	$4,4 \cdot 10^7$

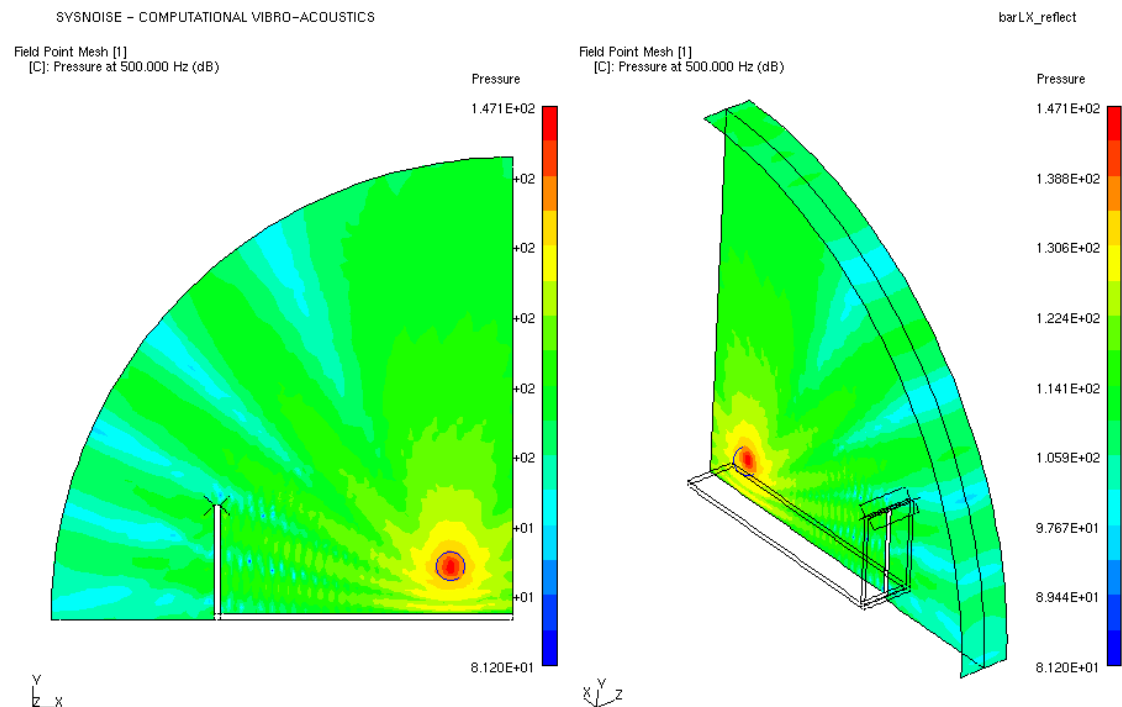
Tab.1. Vlastnosti materiálů použitých v modelech.

3. Rozložení hladin akustického tlaku v závislosti na tvaru bariéry

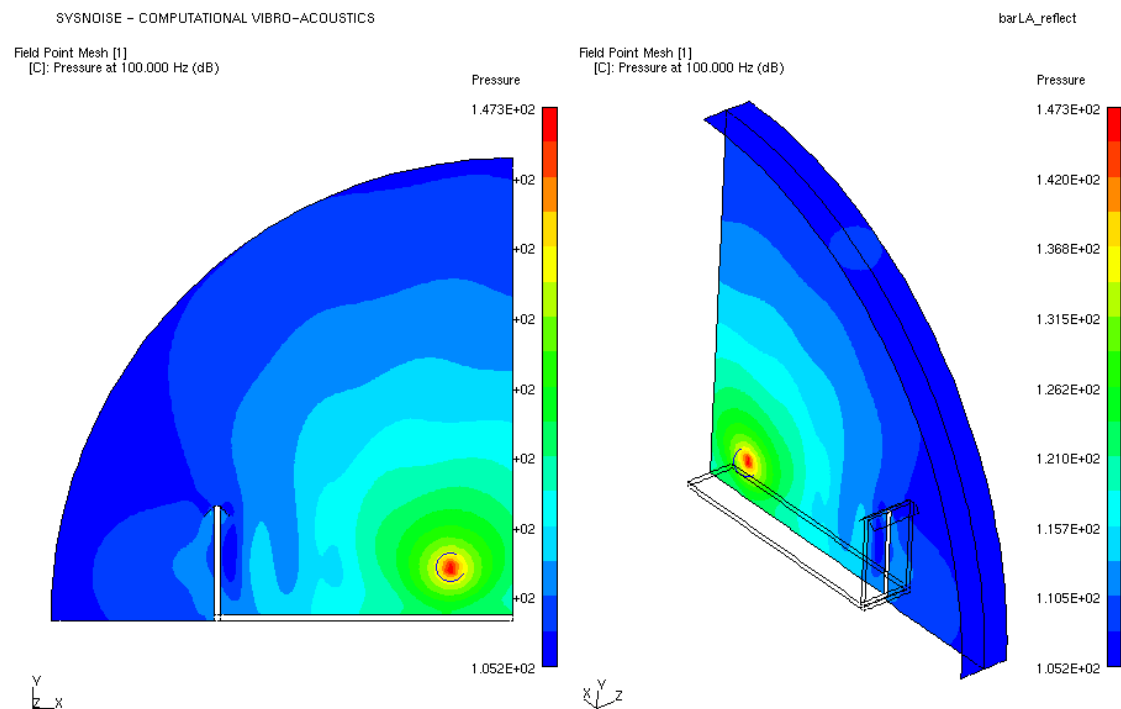
Výsledky výpočtů jsou prezentovány formou akustických map. Na obrázcích 1. až 12. je znázorněno rozložení hladin akustického tlaku u konkrétní bariéry. Pro srovnání byly provedeny výpočty při dvou frekvencích. Protože při nízkých frekvencích jsou difrakční jevy výraznější, byly jako výpočtové frekvence záměrně zvoleny poměrně nízké frekvence 100Hz a 500Hz, u kterých jsou výrazné difrakční jevy.



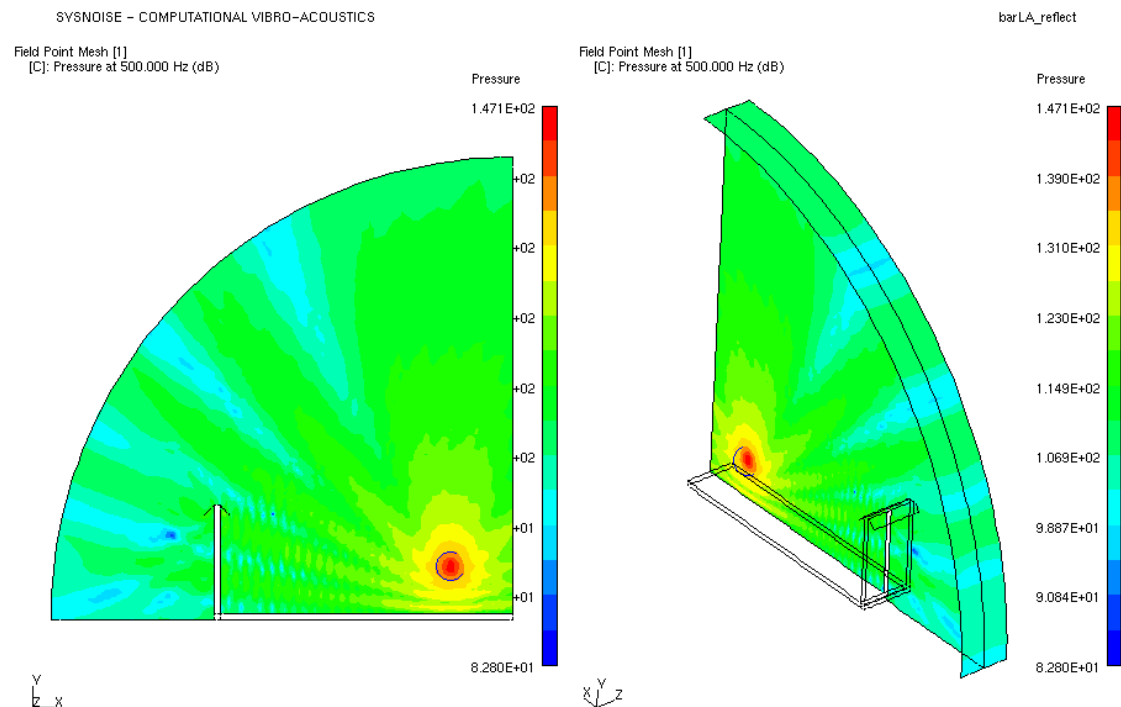
Obr.3. Hladiny akustického tlaku u bariéry L při frekvenci zdroje 100Hz.



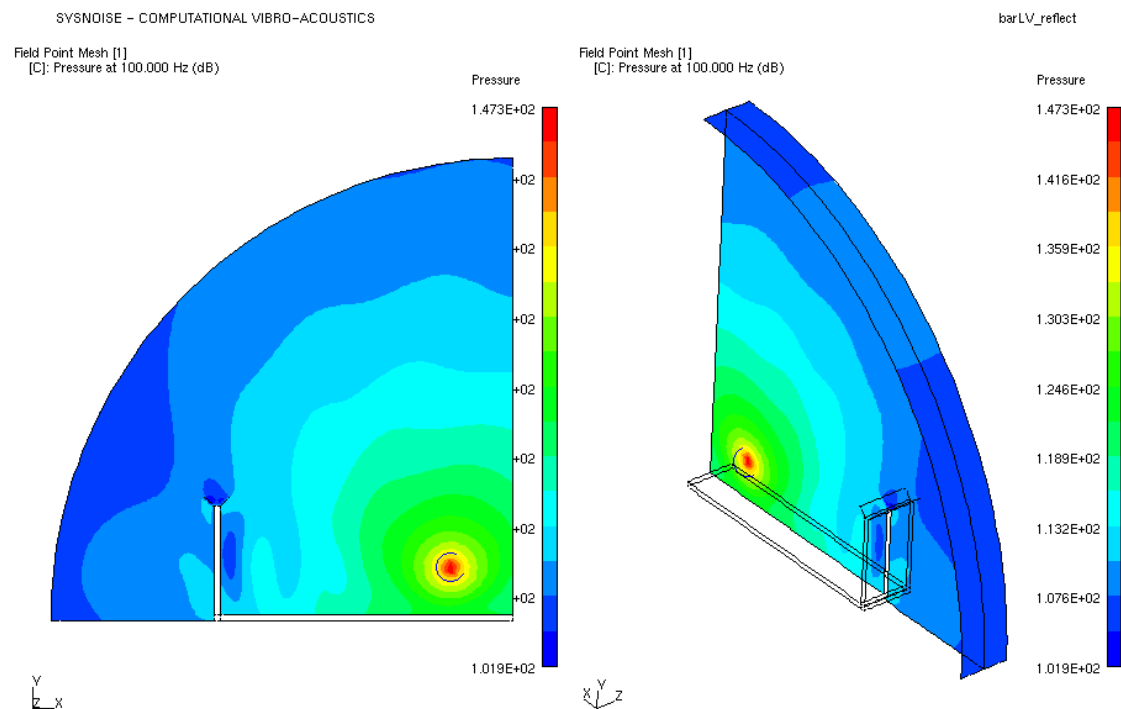
Obr.4. Hladiny akustického tlaku u bariéry L při frekvenci zdroje 500Hz.



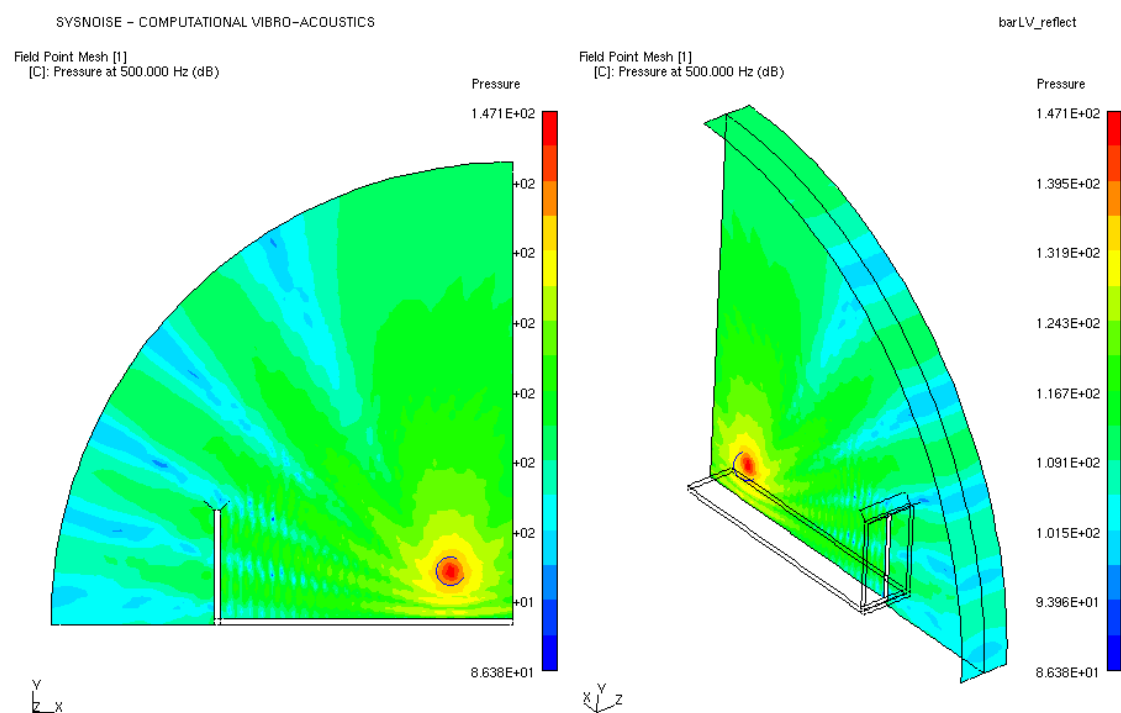
Obr.5. Hladiny akustického tlaku u bariéry LA při frekvenci zdroje 100Hz.



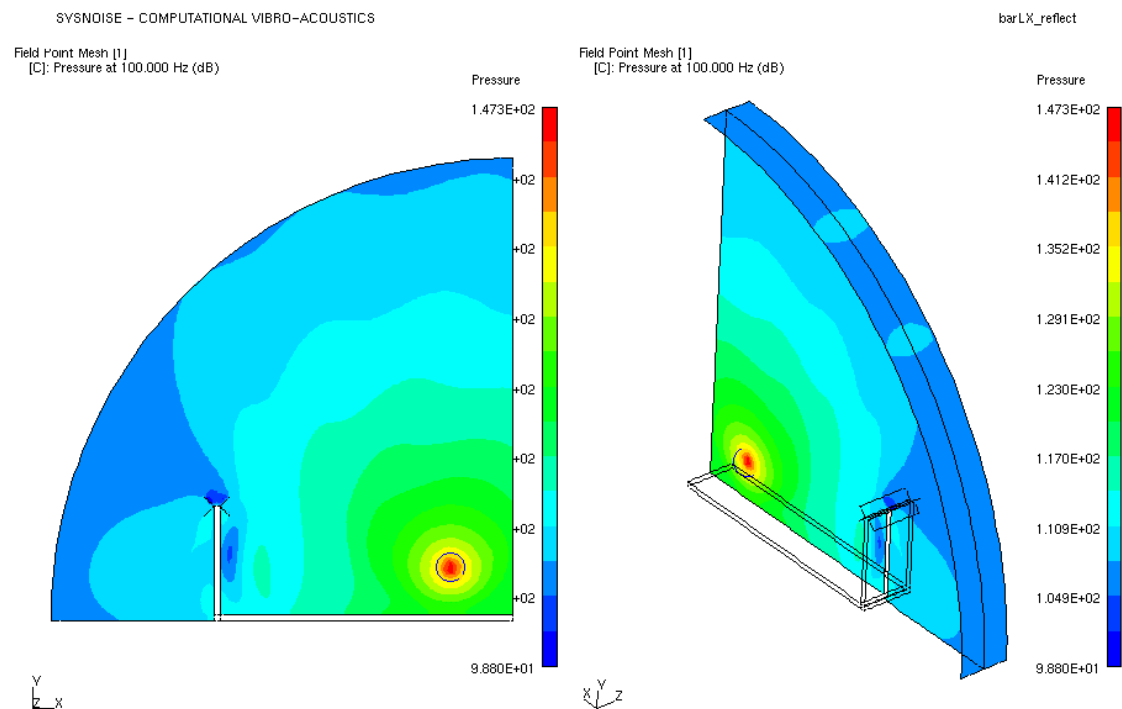
Obr.6. Hladiny akustického tlaku u bariéry LA při frekvenci zdroje 500Hz.



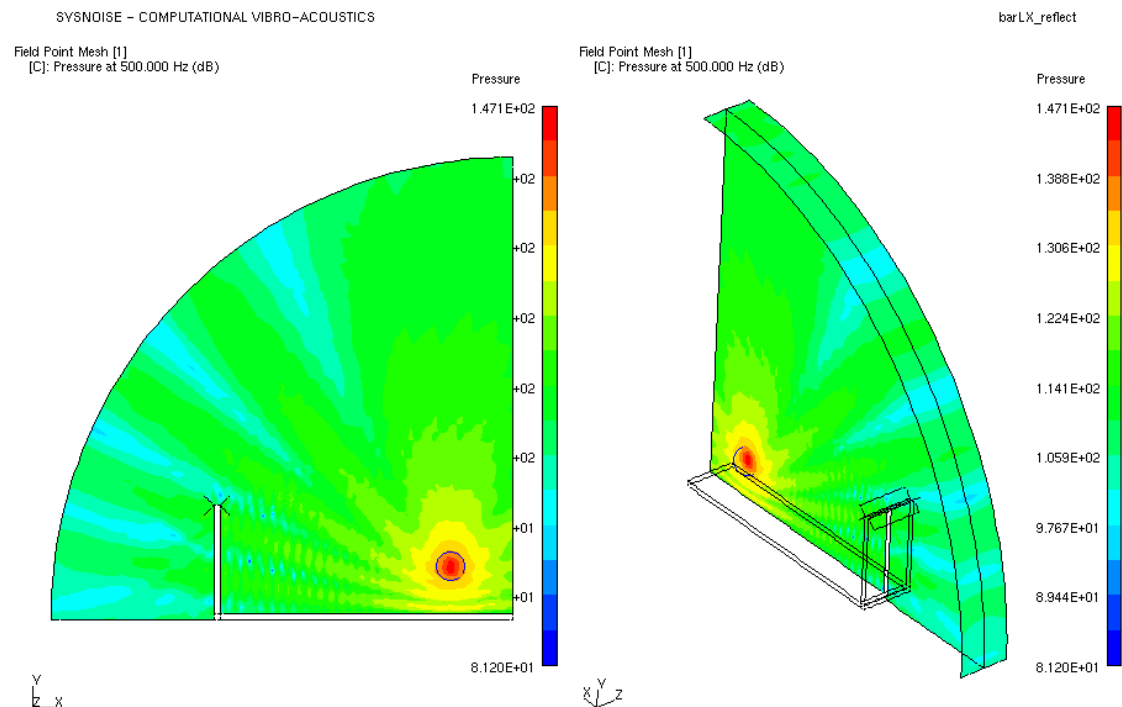
Obr.7. Hladiny akustického tlaku u bariéry LV při frekvenci zdroje 100Hz.



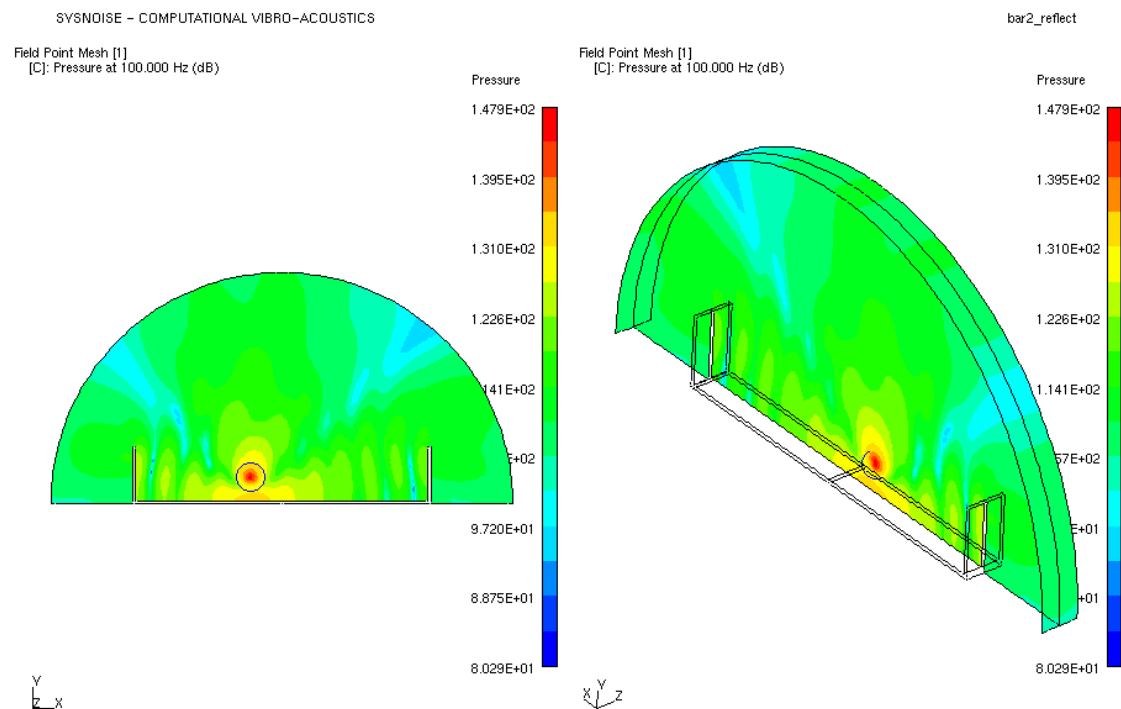
Obr.8. Hladiny akustického tlaku u bariéry LV při frekvenci zdroje 500Hz.



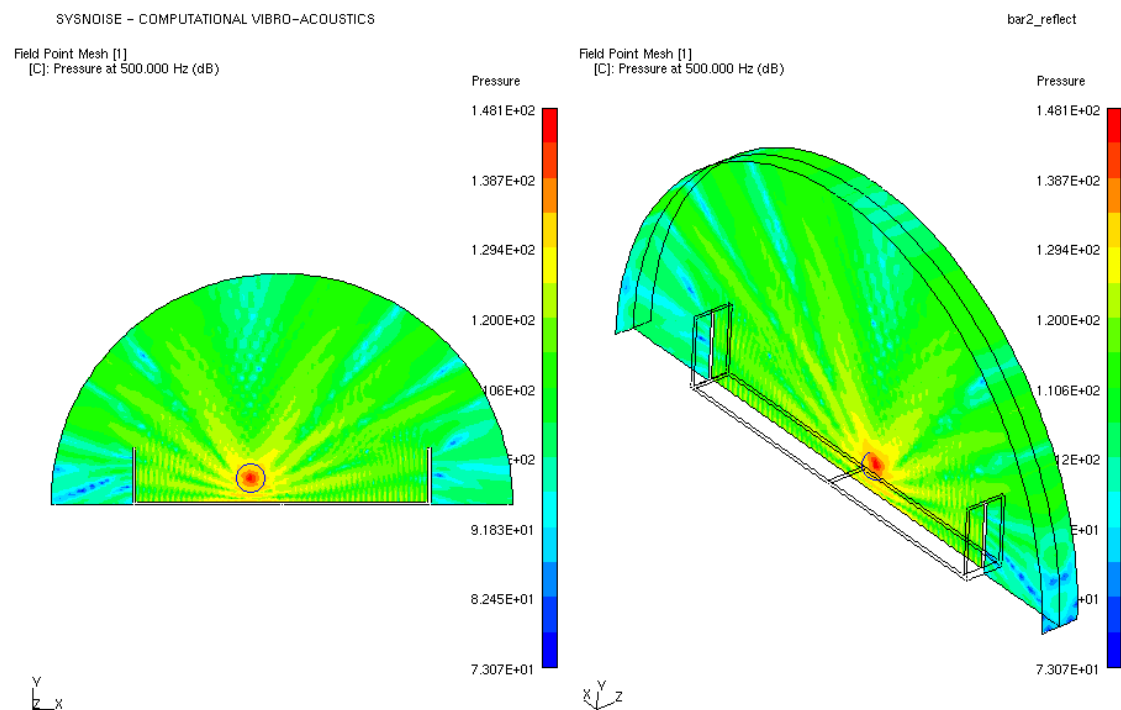
Obr.9. Hladiny akustického tlaku u bariéry LX při frekvenci zdroje 100Hz.



Obr.10. Hladiny akustického tlaku u bariéry LX při frekvenci zdroje 500Hz.



Obr.11. Hladiny akustického tlaku u bariéry 2L při frekvenci zdroje 100Hz.



Obr.12. Hladiny akustického tlaku u bariéry L při frekvenci zdroje 500Hz.

4. Závěr

Hlavními mechanismy šíření dopravního hluku za protihlukovou silniční bariéru jsou difrakční jevy na hraně bariéry a interakce zvukových vln s okolím bariéry. Postihnutí těchto mechanismů proto zásadním způsobem určuje účinnost bariéry. Predikce účinnosti protihlukových bariér se však v současné době provádí pomocí empirických výpočetních modelů, jejichž použití je omezeno na jednoduchou geometrickou konfiguraci bariéry a okolí. Pomocí těchto modelů je velmi obtížné popsat jak difrakci zvukových vln na hraně bariéry, tak jejich interakci s okolím bariéry.

Cílem tohoto příspěvku bylo ověřit použitelnost metody hraničních prvků pro predikci účinnosti protihlukových silničních bariér. Vytvoření modelu pro metodu hraničních prvků je jednoduché, protože je nutno diskretizovat pouze rozhraní akustického modelu, proto lze metodou hraničních prvků snadno modelovat bariéry i poměrně složité geometrie, včetně vlastností materiálu bariéry a okolí. Výsledky ukázaly, že pomocí MHP můžeme řešit predikci účinnosti protihlukové bariéry komplexně, se zahrnutím vlivu difrakce, interakce zvukových vln s okolím i vlivem vlastností použitých materiálů.

Poděkování: Tento příspěvek vznikl v rámci výzkumného záměru číslo MSM 2600001.

Literatura

- [1] Arenas J.P., Monsalve A.M. (2001): Modification of the Diffracted Sound Field by Some Noise Barrier Edge Design. Int. J. Acoust. Vib., Vol. 6, No. 2, 76-82
- [2] Beranek L.L., Vér I.L. (1992): Noise and vibration control engineering. John Wiley and Sons
- [3] Hayek, S.I. (1990): Mathematical modelling of absorbent Highway Noise Barriers. Applied acoustics 31,77-100
- [4] Bowlby W., Cohn L.F. (1986): A model for insertion loss degradation for parallel highway noise barriers. J. Acoust. Soc. Am. 80,855-868
- [5] Kurze U.J., Anderson G.S. (1971): Sound Attenuation by Barriers. Appl. Acoust. 4, 35-53
- [6] Keller, J.B. (1962): The geometrical theory of diffraction. J. Opt. Soc. Am. 52, 116-133
- [7] Mišun, V. (1998): Vibrace a hluk. VUT Brno