



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ ELEKTROAKUSTICKÝCH SYSTÉMŮ V PROSTŘEDÍ COMSOL

MODELING ELECTROACOUSTIC SYSTEMS IN COMSOL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Hanuš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Jan Hanuš

ID: 221467

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Modelování elektroakustických systémů v prostředí COMSOL

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s prostředím COMSOL Multiphysics a prostudujte možnosti fyzikálního modelování akustických a elektroakustických systémů v tomto prostředí. Vytvořte modely elektroakustických systémů pro demonstrování vzniku a šíření zvukového vlnění pro výukové účely. Zaměřte se na reproduktorové soustavy, např. na difrakční jevy na ozvučnici, vliv tvaru membrány a zvukovodu, rozmístění reproduktorů apod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PRYOR, Roger W. Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, 2011, xviii, 852 s. : il. ; 24 cm. ISBN 978-0-7637-7999-3.

[2] HILL, Geoff. Loudspeaker modelling and design: a practical introduction. New York: Routledge, 2019, xliii : ilustrace. ISBN 9780815361336.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 26.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá využitím programu *COMSOL Multiphysics*[®] pro simulace v oblasti elektroakustiky. V práci je obsaženo obecné představení tohoto programu včetně nastínění principu výpočtů metodou konečných prvků, nejvíce využívanou numerickou metodou *COMSOL Multiphysics*. Součástí je také názorný popis jednotlivých kroků potřebných k vytvoření simulace.

Dále je prostor věnován akustickému modulu (*Acoustics Module*), především pak fyzikálnímu rozhraní *Pressure Acoustics*, které je v práci využito. Krátce je zmíněn i *AC/DC Module* a jeho fyzikální rozhraní *Electric Circuit*.

Nakonec jsou v práci krok po kroku popsány autorem vytvořené simulace, které se zabývají vlivem tvarů membrán a zvukovodů na vyzařování reproduktoru a tvary ozvučnic, u kterých je zkoumán vliv difraktovaných vln na frekvenční charakteristiku. Výsledky jednotlivých simulací jsou vždy prezentovány na názorných grafech a následně zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Počítačové simulace, COMSOL Multiphysics, metoda konečných prvků, elektroakustika, membrána reproduktoru, zvukovod, difrakce

ABSTRACT

The thesis aims to explore the simulation software *COMSOL Multiphysics*[®] with relevance to the field of electroacoustics. The work covers general introduction to the software, including an outline of the principles of finite element method, which is the most widely used numerical method in *COMSOL Multiphysics*. It also includes a clear description of the individual steps required to create a simulation.

Furthermore, the *Acoustics Module* is described, *Pressure Acoustics* physics interface in particular as it is used later on in the simulations. The *AC/DC Module* and its physical interface *Electric Circuit* is mentioned briefly as well.

Finally, the simulations created by the author are explained in a step-by-step manner. These look at the impact of the membrane's and waveguide's geometries on the radiation of the speaker driver, and the shapes of the loudspeaker system's enclosure with the edge diffraction phenomena in mind. The results of the individual simulations are presented using graphs and discussed afterwards.

KEYWORDS

Computer Simulations, COMSOL Multiphysics, Finite Element Method, Electroacoustics, Speaker Diaphragm, Waveguide, Diffraction

HANUŠ, Jan. *Modelování elektroakustických systémů v prostředí COMSOL*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 79 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jan Hanuš
VUT ID autora: 221467
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Modelování elektroakustických systémů
v prostředí COMSOL

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Martinu Kožíškovi a především panu Matouši Lorencovi z firmy HUMUSOFT za velkou vstřícnost a čas, který mi věnovali v rámci konzultací. Za jejich odbornou pomoc při řešení problémů, které při simulacích vyvstaly, jsem velmi vděčný. Také děkuji vedoucímu práce panu Jiřímu Schimmelovi za konzultace a zpětnou vazbu.

Obsah

Úvod	12
1 Diferenciální rovnice	13
1.1 Využití diferenciálních rovnic v praxi	13
1.2 Metoda konečných prvků	14
1.2.1 Princip	14
1.2.2 Příklad výpočtu pro 1D výpočetní oblast	14
2 COMSOL Multiphysics	19
2.1 COMSOL Desktop	19
2.1.1 Tvorba modelu	20
2.2 Acoustics Module	23
2.2.1 Pressure Acoustics	24
2.2.2 Elastic Waves	27
2.3 AC/DC Module	28
2.3.1 Electrical Circuit	28
3 Vlastní simulace	30
3.1 Vliv tvaru membrány reproduktoru na jeho vyzařování	30
3.1.1 Postup	31
3.1.2 Výsledky	35
3.1.3 Frekvenční charakteristiky ve vzdálenosti 1 m	42
3.2 Směrové charakteristiky zvukovodů	46
3.2.1 Postup	47
3.2.2 Výsledky	49
3.3 Reproduktorová ozvučnice a difrakce	53
3.3.1 Postup	54
3.3.2 Výsledky	59
Závěr	65
Literatura	67
Seznam zkratk	69
A Porovnání blízkého zvukového pole různých tvarů membrány	70
A.1 Kruhový píst, rozvinutelný tvar a kopule	70
A.2 Tři varianty kuželovitého tvaru kruhového průřezu	71

B	Směrové charakteristiky zvukovodů	72
B.1	Kónický tvar, konstantní úhel	72
B.2	Kónický tvar, konstantní průměr ústí D	74
B.3	Exponenciální tvar, poměr průměru ústí D a délky je stejný jako u B.1	76
B.4	Exponenciální tvar, konstantní průměr ústí D	78

Seznam obrázků

1.1	Testovací funkce $W(x_n)$	17
2.1	Grafické rozhraní <i>COMSOL Desktop</i> [®] – stromová struktura modelu v okně <i>Model Builder</i> (vlevo), nastavení studie v okně <i>Settings</i> (uprostřed), vizualizace výsledků v okně <i>Graphics</i> (vpravo).	23
2.2	Ukázka označení uzlů/vývodů součástí u jednoduchého elektrického obvodu.	29
3.1	Příklad finální geometrie osově symetrického 2D komponentu: membrána rozvinutelného tvaru kruhového průřezu v rovinné ozvučnici.	32
3.2	Rozpracovaná a finální b geometrie eliptické membrány v rovinné ozvučnici.	33
3.3	Kombinace strukturované a nestrukturované (trojúhelníkové) sítě na povrchu membrány a ozvučnice a a strukturovaná síť <i>Swept</i> použitá na diskretizaci domény PML b.	34
3.4	Akustický tlak ve výpočetní oblasti pro $kR = 5$, rozvinutelný tvar, typ množiny výsledků: <i>Solution</i> a a <i>Revolution 2D</i> b.	35
3.5	Hladina akustického tlaku pro $kR = 3$, píst a a rozvinutelný tvar b.	37
3.6	Hladina akustického tlaku pro $kR = 5$, píst a a rozvinutelný tvar b.	37
3.7	Hladina akustického tlaku pro $kR = 10$, rozvinutelný tvar a a kopulovitý tvar b.	38
3.8	Hladina akustického tlaku pro $kR = 5$, parabolický tvar a a hyperbolický tvar b.	38
3.9	Směrová charakteristika kruhového pístu: teoretický výpočet versus simulace.	40
3.10	Srovnání směrové charakteristiky kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu.	40
3.11	Srovnání směrové charakteristiky kruhového rozvinutelného, kruhového konvexního a kruhového konkávního tvaru membrány.	41
3.12	Směrová charakteristika kopulovitého tvaru membrány.	41
3.13	Srovnání směrové charakteristiky eliptického tvaru membrány v závislosti na jejím natočení.	42
3.14	Srovnání frekvenční charakteristiky membrány tvaru kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu pro $D = 8$ palců.	44
3.15	Srovnání frekvenční charakteristiky membrány tvaru kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu pro $D = 4$ palce.	44
3.16	Srovnání frekvenční charakteristiky kruhového pístu a kopulovitého tvaru membrány pro $D = 2$ palce.	45

3.17	Řez geometriemi, zachování tvaru pro kónický a a exponenciální b tvar, konstantní průřez ústí pro kónický c a exponenciální d tvar. . .	47
3.18	Příklad finální geometrie: exponenciální tvar, $D = 12$ palců, $\alpha = 46,5^\circ$.	49
3.19	Srovnání směrové charakteristiky kónického zvukovodu pro dvě různé velikosti průměru ústí D v závislosti na kmitočtu, $\alpha = 25,6^\circ$	50
3.20	Srovnání směrové charakteristiky exponenciálního zvukovodu pro dvě různé velikosti průměru ústí D v závislosti na kmitočtu, poměr D a l odpovídá úhlu α pro kónický zvukovod.	51
3.21	Srovnání směrové charakteristiky kónického zvukovodu pro dva různé kmitočty v závislosti na úhlu α	51
3.22	Srovnání směrové charakteristiky exponenciálního zvukovodu pro dva různé kmitočty v závislosti na poměru D a l odpovídající úhlu α pro kónický zvukovod.	52
3.23	Vznik difraktovaných vln na hranách přední desky ozvučnice, půdorys.	53
3.24	Finální geometrie kapkovitého tvaru a a její zobrazení v prostorub. .	56
3.25	Schéma zapojení pasivní výhybky Linkwitz-Riley druhého řádu včetně popisu uzlů.	56
3.26	Ukázka trojúhelníkové sítě na stěnách ozvučnice, $f_r = 30$ mm.	58
3.27	Srovnání frekvenční charakteristiky bodového zdroje v ozvučnici tvaru koule a kapky.	60
3.28	Srovnání frekvenční charakteristiky bodového zdroje v krychlové ozvučnici.	61
3.29	Srovnání frekvenční charakteristiky bodového zdroje v kvádrové ozvučnici.	62
3.30	Amplitudová a fázová charakteristika pasivní výhybky Linkwitz-Riley druhého řádu.	63
3.31	Srovnání frekvenční charakteristiky dvoupásmové regálové reproduktorové soustavy.	63

Seznam tabulek

3.1	Výčet části globálních parametrů, model membrán.	31
3.2	Simulované frekvence, model membrán.	36
3.3	Výčet části globálních parametrů, model zvukovodů.	48
3.4	Výčet části globálních parametrů, model ozvučnic.	55

Úvod

Počítačové simulace jsou v dnešní době nepostradatelným pomocníkem napříč obory vědy a techniky. Představují užitečný nástroj, díky kterému jsme schopni předpovídat chování reálných systémů. Velkým tématem jsou pro vývojáře, kteří s jejich pomocí mohou „odzkoušet“ a následně optimalizovat své návrhy ještě předtím, než se stanou fyzickými prototypy. Takovýto přístup šetří čas i peníze.

Počítačové simulace se také dají velmi vhodně využít k výukovým účelům – umožňují demonstrovat různé fyzikální děje, jejichž teoretický popis je velmi složitý, v krajním případě téměř nemožný, a to velmi intuitivně pomocí názorných grafů. Například v oblasti elektroakustiky lze jednoduše analyticky vyjádřit směrová charakteristika pístově kmitající kruhové membrány pro vzdálené pole. Pokud bychom však chtěli matematicky popsat směrovou charakteristiku komplexnějšího tvaru, tento popis by byl velmi náročný.

Hlavním cílem této práce je tedy vytvoření jednoduchých simulací v oblasti elektroakustiky za pomoci nástroje *COMSOL Multiphysics*[®]. Jejich výsledky budou sloužit jako pomůcka při výuce předmětu Elektroakustika 1 na Ústavu telekomunikací FEKT VUT. Součástí práce jsou celkem tři simulace: První z nich zkoumá vliv tvaru membrány reproduktoru na jeho vyzařování – jak ve vzdáleném, tak blízkém poli. Druhá simulace se zabývá zvukovody, respektive dává do souvislosti tvar zvukovodu s jeho směrovými charakteristikami. Nakonec je věnován prostor difrakcím, ke kterým dochází na hranách ozvučnice reproduktorové soustavy. Jsou srovnány frekvenční charakteristiky pro bodový zdroj vsazený do ozvučnic různých geometrií. Součástí modelu jsou také frekvenční charakteristiky idealizované dvoupásmové reproduktorové soustavy.

V první kapitole je stručně vysvětleno využití diferenciálních rovnic, bez kterých by se výpočet jakýchkoliv simulací neobešel, včetně podrobnějšího popisu hojně využívané numerické *metody konečných prvků*. Druhá kapitola je věnována představení prostředí *COMSOL Multiphysics*, která shrnuje jeho součásti, obecný postup při tvorbě modelu, a také obsahuje rozebrání akustického modulu (*Acoustics Module*). Součástí je i popis konkrétních fyzikálních rozhraní, jež jsou v praktických modelech využity. Ve třetí kapitole jsou podrobně rozebrány všechny výše zmíněné simulace. Každá jednotlivá sekce obsahuje potřebný teoretický úvod, jednotlivé kroky tvorby daného modelu a nakonec výsledky ve formě grafů doplněné o komentář.

1 Diferenciální rovnice

Důležitým krokem při tvorbě počítačové simulace je matematický popis fyzikálního problému. Ať se jedná o mechaniku tuhého tělesa, termodynamiku nebo teorii elektromagnetického pole, jevy ze jmenovaných i mnohých dalších odvětví fyziky lze popsat pomocí obyčejných či parciálních diferenciálních rovnic (ODR, PDR, v pořadí). Jako příklad známé ODR poslouží Druhý Newtonův zákon, který říká, že síla působící na těleso je rovna časové změně hybnosti – vyjádřeno matematicky:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}, \quad (1.1)$$

kde \mathbf{F} je vektor působící síly a \mathbf{p} vektor hybnosti.

Co se týče PDR, lze zmínit rovnici vedení tepla,¹ která vyjadřuje, že časová změna teploty je úměrná druhé derivaci teploty podle prostorových souřadnic neboli změně růstu teploty v závislosti na změně prostorových souřadnic – vyjádřeno matematicky:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T, \quad (1.2)$$

kde T představuje teplotu, α tepelnou difuzitu a ∇^2 Laplaceův operátor vyjadřující divergenci gradientu teploty T .

1.1 Využití diferenciálních rovnic v praxi

Aby mohly diferenciální rovnice vyřešit konkrétní problém, součástí zadání musí být také tzv. *počáteční* a *okrajové podmínky*. Počáteční podmínky jsou nutné v případě, že rovnice vyjadřuje závislost na čase. Jejich počet je určen stupněm časové derivace vystupující v rovnici. Počet okrajových podmínek je zase určen stupněm derivace podle prostorových souřadnic. Tyto jsou součástí zadání vždy, když rovnice popisuje závislost na prostorových souřadnicích – definují chování neznámé veličiny na hranici uvažované oblasti. Existují dva základní druhy okrajových podmínek:

- *Dirichletova podmínka*, která určuje přímo hodnotu neznámé veličiny a
- *Neumannova podmínka*, která určuje hodnotu její derivace [1].

Problém zadaný diferenciální rovnicí včetně patřičného počtu počátečních a okrajových podmínek je možné vypočítat. Bohužel, analytická řešení² značné části diferenciálních rovnic, které jsou často aplikovány na komplexní geometrie, buď vůbec

¹Uvedená rovnice platí pro homogenní izotropní prostředí a za předpokladu, že součinitel tepelné vodivosti nezávisí na teplotě.

²Analytické řešení je takové, které sestává z kombinace známých elementárních funkcí (např. exponenciály, trigonometrické funkce či polynomy), a tím pádem obsahuje řešení pro libovolné hodnoty nezávislých proměnných (typicky čas a prostorové souřadnice).

neexistují anebo se pro jejich výpočetní náročnost (primárně z pohledu pokročilé matematické teorie) nevyplácí získat. Z toho důvodu se pro řešení těchto rovnic využívá numerických metod, které jsou schopny jejich řešení určit s nějakou odchylkou [2, 3]. Mezi takovéto metody patří například *metoda konečných diferencí* (MKD), *metoda konečných objemů* (MKO), *metoda hraničních prvků* (MHP) nebo *metoda konečných prvků* (MKP). Poslední ze jmenovaných, jakožto metoda v simulačních programech intenzivně využívaná (prostředí *COMSOL Multiphysics* nevyjímaje), bude na dalších řádcích podrobněji rozebrána.

1.2 Metoda konečných prvků

1.2.1 Princip

Jak název napovídá, princip metody tkví v rozdělení n -rozměrné výpočetní oblasti na konečný počet n -rozměrných prvků neboli elementů. Takto rozdělená výpočetní oblast se nazývá *síť*, průsečíky jednotlivých elementů (případě i body v rozích těchto elementů na hranici dvojrozměrné nebo trojrozměrné výpočetní oblasti) se označují jako *uzly*.

Celkové řešení neznámé veličiny je složeno z řešení přesného v tzv. *integračních bodech*³, a z řešení aproximovaného v bodech ostatních. K této aproximaci slouží tzv. *testovací funkce*⁴ – polynomy, jejichž řád určuje míru aproximace. Zvolení vyššího řádu polynomů znamená menší odchylku od řešení přesného, současně ale také vyšší výpočetní náročnost. Pro každý integrační bod existuje právě jedna testovací funkce.

Pro pochopení principu bude metoda vysvětlena na příkladu pro jednorozměrnou výpočetní oblast. Následující podkapitola čerpá z literatury [4].

1.2.2 Příklad výpočtu pro 1D výpočetní oblast

Mějme ODR druhého řádu

$$\alpha \frac{d^2 u}{dx^2} + \beta = 0 \tag{1.3}$$

platnou na jednorozměrné výpočetní oblasti $\Omega \in \langle 0, L \rangle$ s okrajovými podmínkami $u(0) = 0 \wedge \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} = 0$, kde u je neznámá veličina.

³Jedná se o body, které ve výpočtech dílčích integrálů sloužících pro výpočet dílčích řešení figurují jako jejich meze. V případě lineární aproximace (testovacími funkcemi jsou přímky) jsou těmito integračními body pouze uzly, v případě aproximace polynomy vyšších řádů jsou jimi i body nacházející se mezi jednotlivými uzly.

⁴Existuje více způsobů, jak se dostat k aproximovanému řešení diferenciální rovnice. MKP využívá postupu nazvaného *Galerkinova metoda*, což je jedna z metod vážených reziduí.

Zavedme funkci \hat{u} , která bude vyjadřovat aproximované řešení ODR:

$$\hat{u} \approx u(x). \quad (1.4)$$

Je zřejmé, že pokud do rovnice 1.3 bude dosazena \hat{u} , výsledkem nebude 0, ale nějaká nenulová funkce závislá na x . Tuto nazvěme *reziduum* a označme $R(x)$ – vyjádřeno matematicky:

$$\alpha \frac{d^2 \hat{u}}{dx^2} + \beta = R(x). \quad (1.5)$$

Je třeba zajistit, aby tato funkce měla hodnotu co nejbližší k 0 v celé výpočetní oblasti Ω , čehož je dosaženo tak, že se násobí vhodnou *testovací funkcí* $W(x)$ a integruje přes celou oblast Ω :

$$\int_{\Omega} R(x)W(x)dx = 0. \quad (1.6)$$

Nyní je třeba přejít k tzv. *slabé formulaci* rovnice 1.5. Ta je výhodná, protože v sobě zahrnuje Neumannovy okrajové podmínky, a také díky ní bude snížen řád dané rovnice, což klade nižší nároky na její řešení – funkce \hat{u} nebude muset být hladká v celé oblasti Ω , bude dostačovat, že bude hladká jen po částech.

Dosaďme $R(x)$ z rovnice 1.5 do rovnice 1.6 a dostaneme

$$\int_0^L \left(\alpha \frac{d^2 \hat{u}}{dx^2} + \beta \right) W(x)dx = 0, \quad (1.7)$$

po odstranění závorky

$$\int_0^L \alpha \frac{d^2 \hat{u}}{dx^2} W(x)dx + \int_0^L \beta W(x)dx = 0. \quad (1.8)$$

Využijme metodu *per partes* – $uv = \int u'v dx + \int uv' dx$. V našem případě

$$u = \alpha \frac{d\hat{u}}{dx}, v = W(x),$$

a tedy dostáváme

$$\int_0^L \alpha \frac{d^2 \hat{u}}{dx^2} W(x)dx = \left[\alpha \frac{d\hat{u}}{dx} W(x) \right]_0^L - \int_0^L \alpha \frac{d\hat{u}}{dx} \frac{dW(x)}{dx} dx. \quad (1.9)$$

Dosaďme pravou stranu rovnice 1.9 zpět do rovnice 1.8:

$$\left[\alpha \frac{d\hat{u}}{dx} W(x) \right]_0^L - \int_0^L \alpha \frac{d\hat{u}}{dx} \frac{dW(x)}{dx} dx + \int_0^L \beta W(x)dx = 0, \quad (1.10)$$

neboli

$$\int_0^L \alpha \frac{d\hat{u}}{dx} \frac{dW(x)}{dx} dx = \int_0^L \beta W(x)dx + \left[\alpha \frac{d\hat{u}}{dx} W(x) \right]_0^L, \quad (1.11)$$

kde druhý člen pravé strany rovnice vyjadřuje Neumannovy okrajové podmínky.

MKP využívá diskretizace, a proto oblast Ω rozdělme například na dva stejné elementy. Vzniknou tři uzly, ve kterých nás budou zajímat výsledky neznámé \hat{u} , které je možné vyjádřit pomocí vektoru

$$\hat{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{Bmatrix}. \quad (1.12)$$

Nyní zbývá vyjádřit si rovnici 1.11 diskrétně:

$$\sum_{k=1}^2 \int_{l_k}^{l_{k+1}} \alpha \frac{d\hat{u}_k}{dx} \frac{dW(x)}{dx} dx = \sum_{k=1}^2 \left[\int_{l_k}^{l_{k+1}} \beta W(x) dx + \left[\alpha \frac{d\hat{u}_k}{dx} W(x) \right]_{l_k}^{l_{k+1}} \right], \quad (1.13)$$

kde $\frac{d\hat{u}_k}{dx} = \frac{\hat{u}_{k+1} - \hat{u}_k}{l_{k+1} - l_k}$, meze integrálů l_k až l_{k+1} vyjadřují relativní vzdálenost dvou sousedních uzlů, tj. oblast jednoho elementu, a $\sum_{k=1}^2$ sčítá výrazy pro tyto jednotlivé elementy. Pro získání neznámé $\hat{\mathbf{u}}$ je třeba rovnic 1.13 tolik, kolik existuje uzlů – v tomto případě tři. V každé rovnici bude figurovat jiná funkce $W(x)$, která se vztahuje vždy k určitému uzlu n na souřadnici x_n a platí pro ni:

$$\begin{aligned} W(x_n) &= 1 && \text{pro } x = x_n, \\ W(x_n) &= (0,1) && \text{pro } x \in (x_{n-1}, x_{n+1}), \\ W(x_n) &= 0 && \text{pro všechna ostatní } x. \end{aligned}$$

Nejjednodušší varianta $W(x)$ je polynom prvního stupně, který je zadán rovnicemi

$$W(x) = \frac{x - l_k}{l_{k+1} - l_k}, \text{ pro } k = 1, \quad (1.14)$$

$$W(x) = 1 - \frac{x - l_k}{l_{k+1} - l_k}, \text{ pro } k = 2 \quad (1.15)$$

pro všechny vnitřní uzly oblasti Ω (v tomto případě je vnitřní uzel pouze jeden). Pro krajní uzel zleva bude relevantní pouze rovnice 1.15 pro $k = 1$, protože mu žádný uzel nepředchází, a pro krajní uzel zprava bude relevantní pouze rovnice 1.14 pro $k = 2$, protože na něj žádný další uzel nenavazuje. Jednotlivé $W(x)$ jsou znázorněny na obr 1.1.

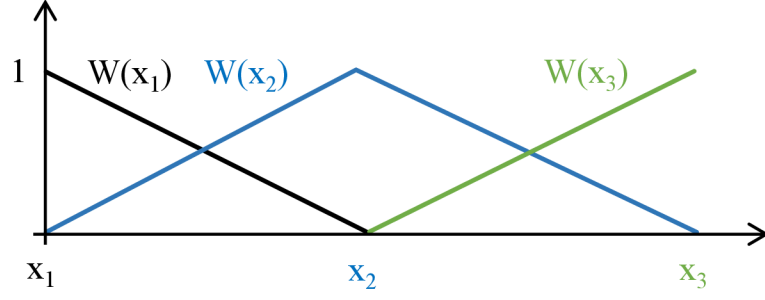
Příklad výpočtu rovnice 1.13 pro $W(x_1)$:

Levá strana:

$$\int_{l_1}^{l_2} \alpha \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1} \frac{-1}{l_2 - l_1} dx + 0 = \alpha \frac{\hat{u}_1 - \hat{u}_2}{(l_2 - l_1)^2} [x]_{l_1}^{l_2} = \alpha \frac{\hat{u}_1 - \hat{u}_2}{(l_2 - l_1)^2} (l_2 - l_1) = \frac{\alpha}{l_2 - l_1} (\hat{u}_1 - \hat{u}_2), \quad (1.16)$$

první člen pravé strany:

$$\int_{l_1}^{l_2} \beta \left(1 - \frac{x - l_1}{l_2 - l_1} \right) dx + 0 = \beta \frac{-1}{2(l_2 - l_1)} [x(x - 2l_2)]_{l_1}^{l_2} = \frac{\beta}{2} (l_2 - l_1), \quad (1.17)$$



Obr. 1.1: Testovací funkce $W(x_n)$.

druhý člen pravé strany:

$$\left[\alpha \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1} \left(1 - \frac{x - l_1}{l_2 - l_1} \right) \right]_{l_1}^{l_2} = -\alpha \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1}, \quad (1.18)$$

a tedy výsledná rovnice 1.13 pro $W(x_1)$:

$$\frac{\alpha}{l_2 - l_1} (\hat{u}_1 - \hat{u}_2) = \frac{\beta}{2} (l_2 - l_1) - \alpha \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1}, \quad (1.19)$$

kde $\frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1} = \frac{du(0)}{dx}$.

Rovnice 1.13 pro $W(x_2)$ a $W(x_3)$ v pořadí, již bez odvození:

$$\alpha \left(\frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1} + \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_3}{l_3 - l_2} \right) = \frac{\beta}{2} (l_2 - l_1 + l_3 - l_2) + \alpha \left(\frac{\hat{u}_3 - \hat{u}_2}{l_3 - l_2} - \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l_2 - l_1} \right), \quad (1.20)$$

$$\frac{\alpha}{l_3 - l_2} (\hat{u}_3 - \hat{u}_2) = \frac{\beta}{2} (l_3 - l_2) + \alpha \frac{\hat{u}_3 - \hat{u}_2}{l_3 - l_2}, \quad (1.21)$$

kde $\frac{\hat{u}_3 - \hat{u}_2}{l_3 - l_2} = \frac{du(L)}{dx}$.

Protože je oblast Ω rozdělena na stejné elementy, platí $l_2 - l_1 = l_3 - l_2 = l$ a rovnice 1.19, 1.20 a 1.21 v pořadí můžeme přepsat následovně:

$$\frac{\alpha}{l} (\hat{u}_1 - \hat{u}_2) = \frac{\beta l}{2} - \alpha \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l}, \quad (1.22)$$

$$\frac{\alpha}{l} (2\hat{u}_2 - \hat{u}_1 - \hat{u}_3) = \beta l + \alpha \left(\frac{\hat{u}_3 - \hat{u}_2}{l} - \frac{\hat{u}_2 - \hat{u}_1}{l} \right), \quad (1.23)$$

$$\frac{\alpha}{l} (\hat{u}_3 - \hat{u}_2) = \frac{\beta l}{2} + \alpha \frac{\hat{u}_3 - \hat{u}_2}{l}. \quad (1.24)$$

Nyní můžeme soustavu rovnic formulovat pomocí matic:

$$\frac{\alpha}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\beta l}{2} \\ \beta l \\ \frac{\beta l}{2} \end{Bmatrix} + \alpha \left\{ \begin{array}{c} -\frac{d\hat{u}(0)}{dx} \\ \frac{d\hat{u}(L)}{dx} - \frac{d\hat{u}(0)}{dx} \\ \frac{d\hat{u}(L)}{dx} \end{array} \right\}. \quad (1.25)$$

První člen na levé straně rovnice se označuje jako *celková matice tuhosti*.

Tento problém je možné rozdělit na dva dílčí, které odpovídají jednotlivým elementům. Pro první element bude soustava vypadat

$$\frac{\alpha}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\beta l}{2} \\ \frac{\beta l}{2} \end{Bmatrix} + \alpha \begin{Bmatrix} -\frac{d\hat{u}(0)}{dx} \\ \frac{d\hat{u}(L)}{dx} \end{Bmatrix}, \quad (1.26)$$

pro druhý element pak

$$\frac{\alpha}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\beta l}{2} \\ \frac{\beta l}{2} \end{Bmatrix} + \alpha \begin{Bmatrix} -\frac{d\hat{u}(0)}{dx} \\ \frac{d\hat{u}(L)}{dx} \end{Bmatrix}. \quad (1.27)$$

Sestavení celkových matic a vektorů pro libovolný počet elementů se provádí následovně: Matice tuhosti jednotlivých elementů se napojí po hlavní diagonále – prvek v prvním řádku a sloupci matice $(n + 1)$ -ho elementu se přičte k prvku v druhém řádku a sloupci matice n -tého elementu a vektory na pravé straně rovnice, které odpovídají dílčím elementům, se po složkách sečtou.

2 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics[®] je software pro tvorbu počítačových simulací, který je vyvíjen společností *COMSOL AB*. Pomocí grafického rozhraní *COMSOL Desktop*[®] uživatel poskytuje prostředí pro tvorbu komplexních modelů a nástroje na jejich analýzu. Tyto mohou být i tzv. multifyzikální – zahrnující libovolný počet navzájem se ovlivňujících fyzikálních jevů. Systém modelovaný tímto způsobem bude mnohem věrněji popisovat realitu.

Funkcionalita tohoto software může být rozšířena pomocí přídatných modulů, které

1. umožňují rozšířené možnosti modelování v konkrétních odvětvích fyziky (např. díky speciálním materiálům, okrajovým podmínkám nebo typům grafů pro vizualizaci výsledků),
2. propojují prostředí s jinými komerčními programy,
3. mají jinou funkci.

Jako příklad první kategorie je možné uvést *Heat Transfer Module*, který poskytuje nástroje pro simulaci přenosu tepla v pevných látkách, kapalinách i plynech [6]. Nebo *AC/DC Module*, který umožňuje modelovat elektromagnetická pole pomocí Maxwellových rovnic [7].

Z druhé kategorie stojí za zmínku např. *LiveLink™ for MATLAB*[®], který obousměrně propojí *COMSOL Multiphysics* s programovým prostředím MATLAB. Uživatel tak může výsledky simulací ve formě číselných dat posílat do prostředí MATLAB a tam je zpracovávat nebo simulace z tohoto prostředí přímo ovládat (např. modifikovat či automatizovat nastavení geometrie, sítě a zpracování výsledků). [8]

Optimization Module je zástupcem poslední kategorie. Jak název napovídá, tento modul slouží k optimalizaci simulovaného zařízení. Vstupní parametry modelu mohou vystupovat jako proměnné ve vhodně zadané funkci a program se poté snaží najít její maximum či minimum. Může se jednat například o vylepšení tvaru háčku, aby vydržel vyšší zátěž či tvaru výškového reproduktoru, aby jeho frekvenční charakteristika byla v daném spektru frekvencí co nejvyrovnanější. [9]

2.1 COMSOL Desktop

Ke kompletnímu nastavení simulace od nakreslení geometrie až po zpracování výsledků slouží grafické rozhraní *COMSOL Desktop*[®]. Hlavním ovládacím „centrem“ modelu je okno nazvané *Model Builder*, které zobrazuje jednotlivé příkazy zadané uživatelem pomocí tzv. uzlů. Tyto uzly jsou uspořádány pomocí stromové struktury (rozvětvují se do dalších poduzlů). Jejich nastavení probíhá v okně *Settings*, vizualizace modelu případně výběr geometrických entit v okně *Graphics*.

2.1.1 Tvorba modelu

Každý model obsahuje 4 hlavní uzly:

- *Global Definitions* – zde lze definovat parametry, proměnné nebo vlastnosti materiálů platné pro celý model (pro všechny součásti modelu),
- *Component* – tento uzel sdružuje veškeré definice pro jednu konkrétní součást modelu – kromě výše zmíněných položek také geometrii, síť a nastavení fyzikálního rozhraní,
- *Study* – pod tímto uzlem uživatel nastavuje, jakým způsobem se bude výpočet požadovaných veličin provádět,
- *Results* – zde dochází ke zpracování výsledků.

Nyní budou stručně popsány důležité kroky, které jsou nezbytné při tvorbě modelu a provádějí se v rámci výše zmíněných uzlů.

Geometrie (Geometry)

Program nabízí možnost kombinovat přístup povrchového a objemového modelování. V případě povrchového modelování jde o kreslení hranic objektů, ze kterých se pomocí příkazů jako jsou vytažení nebo orotování stanou objekty zamýšlené. Např. pro vytvoření kvádrů se v pracovní rovině nakreslí obdélník nebo čtverec, který se příkazem *Extrude* „vytáhne“ z pracovní roviny do prostoru dle specifikovaného vektoru. Pokud jde o objemové modelování, uživatel může využít běžné primitivní tvary jako je kvádr, koule či kužel a kombinovat je pomocí Booleovských operací (např. spojení, rozdíl nebo průnik). V rovině je další možností použití funkce *Sketch* pro vytváření křivek kreslením v grafickém okně.

Alternativou je vytvoření geometrie v CAD programu a její následný import. V tomto případě může být výhodné geometrii určitým způsobem opravit či zjednodušit – třeba v případě, že geometrie obsahuje detaily, které pro simulaci nejsou podstatné, a jejich zahrnutí by znamenalo prodloužení výpočetního času. K tomuto účelu slouží mnoho nástrojů z kategorie *Defeaturing and Repair*. Jako příklad je možné uvést příkaz *Repair*, který automaticky odstraní detaily menší než je nastavená tolerance, nebo *Cap Faces* pro vyplnění děr a tedy uzavření objemu prostorové geometrické entity.

Posledním krokem potřebným k finalizaci geometrie je určení způsobu spojení jednotlivých geometrických objektů, ze kterých se výsledná geometrie komponuje skládá. První možností je metoda *Form Union*, která jednotlivé objekty spojí v jeden. Druhou možností je metoda *Form Assembly*, která původní objekty zachová. Používá se v případě požadavku na vzájemný pohyb jednotlivých objektů.

Přiřazení materiálů (Materials)

Pro přiřazení materiálových vlastností k jednotlivým doménám geometrie slouží uzel *Materials*. Tyto vlastnosti (fyzikální veličiny) si uživatel může nadefinovat sám nebo mu je k dispozici obsáhlá knihovna materiálů. Jako příklad je možné uvést třeba objemovou hustotu a rychlost šíření zvuku, které jsou potřeba k výpočtu zvukového pole.

Pokud daný materiál bude využívat více součástí (tzv. komponentů), není třeba jeho vlastnosti definovat pod každým komponentem zvlášť, ale stačí je určit pod uzlem *Global Definitions* a následně je ke konkrétním komponentům přiřadit pomocí funkce *Material Link*. Další velmi praktickou funkcí je tzv. *Material Switch*, která pod sebou sdruží několik materiálů a následný výpočet je možné provést postupně pro všechny tyto materiály automatizovaně.

Nastavení fyziky (Physics)

Zde jde o vybrání a také nastavení fyzikálního rozhraní, které se bude při výpočtu simulace využívat. Důležitou součástí je nastavení okrajových podmínek které určí, jakým způsobem se budou „chovat“ hranice domén ve výpočetní oblasti. Může to být třeba předpis harmonické výchylky vektoru akustické rychlosti nebo ukotvení bodu či plochy v prostoru.

Tvorba sítě (Mesh)

Jak již bylo zmíněno v 1.2, vytvořením sítě se geometrie rozdělí na konečný počet elementů, které jsou stěžejní pro určení integračních bodů, ve kterých dochází k výpočtu přesného řešení neznámé veličiny. V případě 1D geometrie jsou elementy úsečky, u 2D geometrie jsou jimi trojúhelníky a čtyřúhelníky a v případě 3D geometrie potom jehlany a hranoly (typicky trojboké).

Z pohledu pravidelnosti je možné síť rozdělit na *strukturovanou* a *nestrukturovanou*. Nestrukturovaná síť je vhodná pro jakoukoliv geometrii. Její parametry závisí na tvaru geometrie a může být nastavena automaticky. Naproti tomu strukturovaná síť se nastavuje vždy manuálně a má opakující se strukturu, což urychluje výpočet.

Správné nastavení sítě je předpokladem pro získání validních výsledků při výpočtu. Její jemnost by měla být vyšší na zakřivených plochách a v oblastech, kde se očekává výrazná změna veličin. Pro určení kvality sítě slouží funkce statistiky, která nabízí zhodnocení kvality jednotlivých elementů sítě podle uživatelem zvoleného kritéria. Jedním z nich je poměr obsahu (nebo objemu) elementu a obvodu kružnice (nebo povrchu kulové plochy) jemu opsané, které vychází z následujícího předpokladu: čím méně se velikosti vnitřních úhlů elementu liší, tím je element kvalitnější. Dalším vhodným způsobem určení kvality sítě může být provedení analýzy

nezávislosti řešení na síti, kdy je třeba vytvořit více sítí s odlišnou jemností a poté vykreslit graf závislosti řešení na použité síti.[10]

Nastavení a spuštění výpočtu (Study)

V tomto uzlu uživatel vybírá, nastavuje a spouští studie. Jejich nabídka je závislá na výběru fyzikálního rozhraní. Jedním ze zástupců studií, které jsou dostupné pro většinu fyzikálních rozhraní, je tzv. *Stationary* studie, u které se proměnné definující chování daného systému v čase nemění – k výpočtu dochází v ustáleném stavu. Dalším příkladem je *Time Dependent* studie, u které se naopak tyto proměnné v čase mění a řešení na čase závislé je.

U každé studie dochází k jejímu nastavení – např. u studie *Time Dependent* jsou hlavními parametry, které je třeba nastavit, časové rozmezí a časový krok. V nich bude docházet k ukládání výsledků výpočtu. V případě, že model obsahuje více fyzikálních rozhraní, vybere se, která budou do studie zahrnuta. Stejný princip platí i v případě vícera vytvořených sítí.

Na základě vybraného typu studie program vybere konkrétní řešič, pomocí kterého dochází k výpočtu studie. Výchozí nastavení řešiče jde uživatelem měnit.

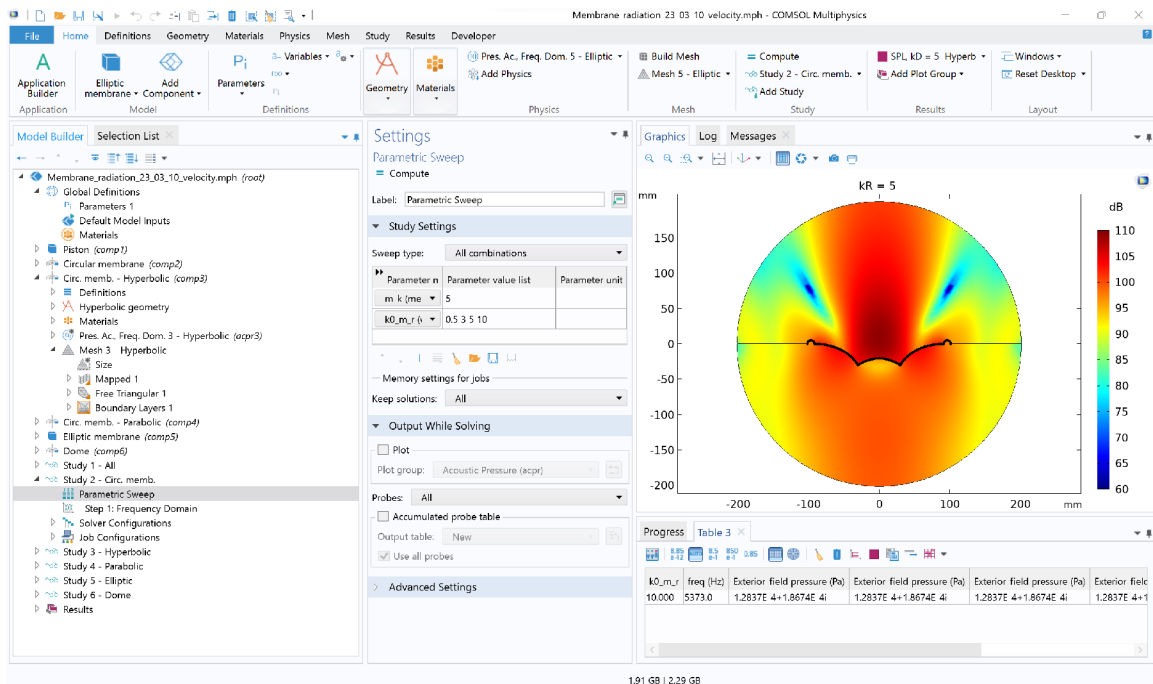
Zpracování výsledků (Results)

Zde jsou obsaženy nástroje pro kompletní analýzu výsledků simulace, která byla v uzlu Study spočítána. „Surová“ data jsou uložena v uzlu *Datasets*. Z nich, z jejich podmnožin¹ anebo z dalších odvozených hodnot² vytvořených uživatelem lze následně vytvářet grafické vizualizace v podobě grafů nebo animací. Tyto lze následně také exportovat. Samozřejmostí je exportovat veškerých dat do textového souboru.

Protože podstatou této práce je modelování v oblasti elektroakustiky, v další části bude stručně shrnut akustický modul a podrobněji rozebrány fyzikální rozhraní, které jsem využil k vytvoření simulací.

¹Např. hodnoty v jednom konkrétním bodě výpočetní oblasti.

²Tzv. *Derived Values* – průměr, integrál nebo třeba maximum vztažené ke konkrétní geometrické entitě.



Obr. 2.1: Grafické rozhraní *COMSOL Desktop*[®] – stromová struktura modelu v okně *Model Builder* (vlevo), nastavení studie v okně *Settings* (uprostřed), vizualizace výsledků v okně *Graphics* (vpravo).

2.2 Acoustics Module

Akustický modul obsahuje celkem osm typů fyzikálních rozhraní, které slouží k simulaci šíření zvuku a vibrací v různých situacích a pro různá skupenství:

- *Pressure Acoustics* je založeno na řešení vlnové rovnice (případně Helmholtzovy rovnice) a řeší šíření zvukových vln v tekutinách pro frekvenční i časovou oblast.
- *Elastic Waves* poskytuje nástroje k modelování šíření zvukového vlnění v pevných látkách a porézních materiálech.
- *Acoustic-Structure Interaction* spojuje předchozí dvě rozhraní a uživateli umožňuje řešit multifyzikální úlohy, které spojují šíření zvuku v pevných látkách a tekutinách zároveň.
- *Aeroacoustics* dává do kontextu zvukové pole a mechaniku tekutin – zde je možné simulovat změny akustických veličin v závislosti na stacionárním proudění tekutin.
- *Thermoviscous Acoustics* ve svých výpočtech zahrnuje změnu energie částic vlivem vedení tepla a ztrát způsobených viskozitou tekutiny. Používá se pro přesnou simulaci modelů malých rozměrů (např. elektroakustické měniče v mobilních zařízeních).

- *Ultrasound* slouží k modelování šíření akustických signálů na dlouhé vzdálenosti ve srovnání s vlnovou délkou vlnění (např. ultrazvukové průtokoměry) nebo nelineárních akustických vln s velkou amplitudou.
- *Geometrical Acoustics* je primárně určeno pro analýzu uzavřených prostor. Využívá buď principy geometrické akustiky (zvukové vlnění se šíří pomocí tzv. *zvukového paprsku* a nedochází k ohybu zvukových vln), anebo počítá s rovnicí difuze, která řeší hustotu akustické energie v daném prostoru.
- *Pipe Acoustics* umožňuje jednorozměrně modelovat šíření zvukového vlnění v trubici – rozhraní zohledňuje její elastické vlastnosti.[11, 12]

2.2.1 Pressure Acoustics

V tomto fyzikálním rozhraní lze modelovat šíření zvukových vln v kapalinách a plynech, kde nedochází k proudění. Vlny se zde šíří pouze podélně, tj. výchylka kmitajících částic je rovnoběžná se směrem šíření vlny. Závislou proměnnou je akustický tlak. Výhradním zdrojem informací pro tuto podkapitolu je literatura [11].

V rozhraní *Frequency Domain* program řeší Helmholtzovu rovnici, zvukový zdroj musí generovat signál s harmonickým průběhem. V rozhraní *Transient* jde o řešení skalární vlnové rovnice v časové oblasti a budící signál zvukového zdroje může mít libovolný časově závislý průběh, který může být zadán analytickou funkcí nebo například konkrétními (naměřenými) hodnotami, kterými program umí proložit interpolační křivku.

Fluid model

Prvním důležitým krokem při popisu simulace je přiřazení doménám³ matematický model prostředí, ve kterém se zvukové vlnění bude šířit. Výchozím nastavením je model *Linear elastic*, který neuvažuje žádné ztráty⁴. Uživatel může vybrat ze spousty dalších, například *Atmosphere attenuation*, u kterého ztráty závisí na atmosférickém tlaku, teplotě a relativní vlhkosti nebo *User-Defined Attenuation*, kde si uživatel nastaví vlastní koeficient pohltivosti (typicky experimentálně změřený).

Okrajové podmínky

Okrajové podmínky nadefinují, jakým způsobem se budou „chovat“ hranice domén ve výpočetní oblasti. Toto chování je popsáno pomocí veličin, které popisují akus-

³Doména je geometrická entita, která má rozměr shodný s rozměrem modelu (např. pokud je model trojrozměrný, doménami se nazvou všechny trojrozměrné geometrické entity).

⁴Za předpokladu, že jsou parametry nadefinovaných materiálů v doménách reálná čísla.

tické pole – např. akustický tlak, akustická rychlost nebo akustické⁵ zrychlení. Je důležité zmínit, že všechny vnější hranice výpočetní oblasti musí mít okrajové podmínky přiřazeny.

Výchozí okrajovou podmínkou, která je předepsána pro všechny vnější hranice výpočetní oblasti, je *Sound Hard Boundary (Wall)*, která předepisuje nulovou hodnotu normálové složky akustického zrychlení (a tedy i normálové složky akustické rychlosti). Zvukové vlnění dopadající na tuto hranici je ve fázi odraženo zpět do výpočetní oblasti a to bez jakéhokoliv útlumu.

Zobecněným případem této okrajové podmínky je *Impedance*, vyjadřující specifickou akustickou impedanci \mathbf{Z}_S zadanou vztahem

$$\mathbf{Z}_S = \frac{p}{\mathbf{v}}, \quad (2.1)$$

kde p představuje akustický tlak a \mathbf{v} vektor akustické rychlosti. Při této okrajové podmínce bude část akustické energie na hranici pohlcena a část vyzářena zpět do výpočetní oblasti v závislosti na vztahu mezi specifickými akustickými impedancemi prostředí a okrajové podmínky. Přesnou míru určuje veličina nazvaná odrazivost – R . Protože je specifická akustická impedance komplexní veličinou, odražená vlna může mít různý fázový posuv v závislosti na velikosti její imaginární složky. Současně její hodnota může být frekvenčně závislá.

V případě, že je zapotřebí simulovat šíření zvukového vlnění do volného prostoru, přichází na řadu okrajové podmínky, které zajistí, aby bylo toto vlnění na okraji výpočetní oblasti pohlceno a nedocházelo tak k jeho odrazu zpět do výpočetní oblasti. Těmito jsou: *Plane Wave Radiation*, *Cylindrical Wave Radiation* a *Spherical Wave Radiation*. První v pořadí je vhodná pro rovinnou, druhá pro válcovou a třetí pro kulovou vlnu – předpoklad správné funkčnosti těchto okrajových podmínek je kolmý dopad zvukových vln na geometrickou entitu, na kterou jsou tyto podmínky aplikovány. Pokud úhel dopadu kolmý nebude, k odrazu vlnění zpět do výpočetní oblasti dojde. V této situaci je možné využít virtuální absorpční vrstvy zvané *Perfectly Matched Layer*.

Perfectly Matched Layer (PML)

Je to virtuální vrstva, která se přiřadí geometrické entitě, která tvoří vnější hranici výpočetní oblasti, a její funkce je zvukové vlnění maximálně pohltit. Tato vrstva je efektivní i v případě, že na ni zvukové vlnění dopadne pod jiným úhlem než 90° .

V rozhraní *Frequency Domain* fyzická tloušťka této vrstvy nehraje žádnou roli – její skutečná tloušťka je určena pomocí parametru *PML scaling factor*, který její

⁵Přívlastek „akustické“ vyjadřuje vztažení veličin k částicím prostředí, kde dochází k šíření akustických vln.

fyzickou tloušťku škáluje na vlnovou délku zvukového vlnění. Hodnota 1 odpovídá délce jedné vlnové délky, která ve většině případů na pohlcení dostačuje a je výchozím nastavením. V rozhraní *Transient* parametr *PML scaling factor* takto fyzickou tloušťku této vrstvy neškáluje, a proto je třeba ji adekvátně nastavit.

Akustický zdroj

Pomocí okrajové podmínky se definuje také zdroj zvukového vlnění – vybere se geometrická entita, která bude zdroj představovat – bod, úsečka nebo plocha, a popíše se její chování fyzikální veličinou. Pro plošné a liniové zdroje zvuku to může být například akustické zrychlení (*Normal Acceleration*), akustická rychlost (*Normal Velocity*) nebo akustická výchylka (*Normal Displacement*).

Diskretizace

Pro určení vhodné „hrubosti“ diskretizace je nutné znát nejvyšší kmitočet zvukového vlnění. Z něj je možné odvodit nejmenší vlnovou délku pomocí vztahu

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{f_{\max}}, \quad (2.2)$$

kde λ_{\min} vyjadřuje nejmenší vlnovou délku, v rychlost šíření zvukové vlny v prostoru a f_{\max} nejvyšší kmitočet. λ_{\min} je klíčová pro prostorovou diskretizaci (tvorbu sítě) – čím menší bude, tím jemnější síť bude muset být zvolena. Obecně je doporučeno prostorovou diskretizaci provést pomocí elementů alespoň druhého řádu⁶ a pro dostatečnou aproximaci je třeba zajistit alespoň 5 elementů na vzdálenosti jedné vlnové délky. Na základě toho platí

$$h_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{5}, \quad (2.3)$$

kde h_{\max} je maximální rozměr elementu sítě.

Časová diskretizace neboli určení časového kroku, které je relevantní pouze pro analýzu v časové oblasti, vychází z tzv. *CFL podmínky* (podle matematiků Couranta, Friedrichse a Lewyho) a je určena vztahem

$$\Delta t = \frac{\text{CFL } h_{\max}}{v}, \quad (2.4)$$

kde Δt odpovídá časovému kroku a CFL je tzv. *Courantovo číslo*. To souvisí s mírou odchylky vnášené do výpočtu aproximovaného řešení. Aby byla zajištěna podobná míra odchylky jako u prostorové diskretizace, volí se CFL = 0,1. Pokud do rovnice 2.4 bude tato hodnota Courantova čísla dosazena a zároveň se h_{\max} vyjádří

⁶Řád elementu označuje řád testovacích funkcí (viz 1.2).

pomocí rovnice 2.3, vznikne předpis pro maximální časový krok:

$$\Delta t_{\max} = \frac{0,1\lambda_{\min}}{5v} = \frac{T_{\min}}{50}, \quad (2.5)$$

kde Δt_{\max} představuje maximální časový krok, λ_{\min} nejmenší vlnovou délku, v rychlost šíření zvukové vlny a T_{\min} nejmenší periodu zvukového vlnění.

2.2.2 Elastic Waves

Toto rozhraní umožňuje analýzu vibrací a šíření vlnění v pevných látkách a v porézních materiálech. K prvně zmíněnému slouží fyzikální rozhraní *Solid mechanics*. Toto vychází z výpočtu deformace tělesa, která vzniká důsledkem vnějších na něj působících sil, tedy přítomností mechanického napětí v tomto tělese. To stejné platí pro fyzikální rozhraní *Poroelastic Waves*, které slouží k určení vibrací a šíření vlnění v látkách porézních. Protože v sobě tyto látky obsahují malé vzduchové dutiny, je třeba také počítat akustický tlak v těchto dutinách a obousměrně propojit tyto dva výpočty – deformace tělesa vytváří akustický tlak v dutinách, který zpětně ovlivňuje míru této deformace.

Material Model

Stejně jako v rozhraní Pressure Acoustics bylo třeba určit matematický model prostředí, zde je třeba nastavit matematický model materiálu daného tělesa. Výchozím nastavením je *Linear Elastic Material*, který předpokládá pružnou deformaci tělesa. Vychází z Hookova zákona, který je pro tah definován jako

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.6)$$

kde ϵ vyjadřuje poměrné délkové prodloužení, σ (Pa) napětí v tahu a E (Pa) modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti). Obdobně, pro smyk je určen vztahem

$$\gamma = \frac{\tau}{G}, \quad (2.7)$$

kde γ je úhel smyku, τ (Pa) napětí ve smyku a G (Pa) modul pružnosti ve smyku (Coulombův modul pružnosti). Pro výpočet tohoto modelu materiálu je tedy potřeba znát jak modul pružnosti v tahu E tak modul pružnosti ve smyku G . Současně musí být známa také hustota materiálu.

Okrajové podmínky

Důležité je nadefinovat uchycení daného tělesa v prostoru a jeho zatížení. Výchozí podmínka vztahující se k uchycení je označena jako *Free* a umožňuje dané geometrické entitě, na které je předepsána, libovolný posuvný i rotační pohyb. Naopak podmínka *Fixed* předepisuje nulový posuv i rotaci. Zatížení může být určeno například podmínkou *Prescribed Displacement* určující vektor posuvu ve zvoleném směru.

2.3 AC/DC Module

Tento modul obsahuje celkem 13 rozhraní, v rámci kterých umožňuje simulovat jevy z oblasti elektrostatiky, magnetostatiky a nízkofrekvenčního⁷ elektromagnetismu. Uživatel má k dispozici statické a přechodové studie pro analýzu rezistorů, kondenzátorů, cívek nebo komplexních elektrických zařízení. Součástí je knihovna specifických nehomogenních a anizotropních materiálů.[13]

Protože jsem v simulacích využil výhradně rozhraní *Electrical Circuit*, blíže přiblížím pouze toto rozhraní.

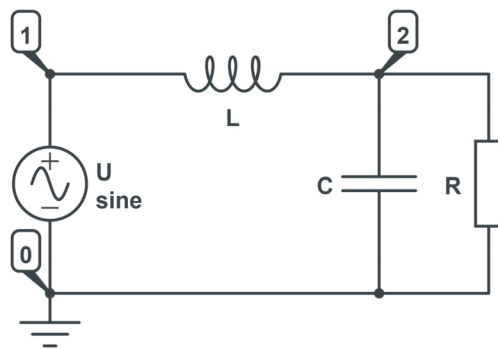
2.3.1 Electrical Circuit

Jak název napovídá, rozhraní *Electrical Circuit* slouží k analýze napětí a proudů v elektrických obvodech. Lze řešit obvody jak ve stacionárním a harmonicky ustáleném stavu, tak časově závislé přechodové děje. Stejně jako v obecně známých simulátorech elektrických obvodů typu SPICE (*LTspice*, *TINA*) či jiných (*CircuitLab*) je možné i zde využít „standardní“ elektrotechnické součástky – rezistory, kapacitory, induktory, bipolární i unipolární tranzistory, napětové a proudové zdroje a spoustu dalších.

Do zmíněných programů analyzující elektrické obvody je integrován schematický editor, ve kterém uživatel může intuitivně elektrická schémata vytvářet a upravovat. Bohužel, tak tomu v rozhraní *Electrical Circuit* není. Jednotlivé součástky se vkládají do stromové struktury podobně jako se definují okrajové podmínky či další funkce v jiných rozhráních. Jednotlivé součástky se mezi sebou propojují pomocí označení uzlů v obvodu – u každé se definuje právě tolik uzlů, kolik součástka obsahuje vývodů. Například pokud v obvodu bude potřeba spojit rezistor a induktor sériově, uzly mezi vývody rezistoru se označí např. 1 a 2, uzly mezi vývody induktoru poté 2 a 3. Kdyby se však součástky spojovaly paralelně, uzly mezi vývody obou součástí by se označily shodně – např. 1 a 2.

Tento způsob může být při vytváření složitějších obvodů nepřehledný. Proto rozhraní disponuje možností importu tzv. SPICE netlistu – textového souboru (s příponou *.cir*), na základě kterého se následně sestaví elektrický obvod do výše popsaného formátu. Stejně tak je možné vytvořený elektrický obvod do formátu SPICE netlist exportovat.

⁷Nezabývá se teorií vysokofrekvenčních elektromagnetických polí ($f = 100\text{ kHz}$ a více). Touto oblastí se zabývá *RF Module*.



Obr. 2.2: Ukázka označení uzlů/vývodů součástek u jednoduchého elektrického obvodu.

3 Vlastní simulace

3.1 Vliv tvaru membrány reproduktoru na jeho vyzařování

V první části této simulace nás bude zajímat, jaký vliv bude mít tvar membrány na zvukové pole v její bezprostřední blízkosti (tzv. Fresnelův prostor). Očekává se, že zvukové pole v této oblasti nebude homogenní, protože zvukové vlnění, které do jednotlivých bodů pole dospěje, je složeno z příspěvků od elementárních plošek membrány, které jsou od posuzovaných bodů jinak vzdáleny. Výsledná interference závisí na vlnové délce vlnění, poloze posuzovaného bodu, průměru a tvaru membrány.

Druhá část simulace se bude zabývat směrovými charakteristikami ve vzdáleném poli. Dle [14] je vzdálené pole kruhového pístu určeno vztahem

$$x \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3.1)$$

kde D je průměr pístu a λ vlnová délka. V této vzdálenosti by měly být směrové charakteristiky nezávislé na vzdálenosti od zdroje.

V poslední části podkapitoly 3.1 budou navíc uvedeny frekvenční charakteristiky membrán ve vzdálenosti 1 m, kterých se následný podrobný popis modelu netýká. Vše související se získáním frekvenčních charakteristik bude popsáno právě ve zmíněné části této podkapitoly.

Pro tuto simulaci jsem vybral pět tvarů membrány, které jsou nejčastěji používány pro elektrodynamické reproduktory – tři kuželovité kruhového průřezu (rozvinutelnou, nerozvinutelnou parabolickou a hyperbolickou), kuželovitou eliptického průřezu a kopulovitou. Známým zjednodušeným příkladem membrány reproduktoru je kruhový píst, který bude modelován také – jeho směrová charakteristika lze vypočítat analyticky a bude sloužit k ověření správnosti simulace. Dle [15], pro směrovou funkci kruhového pístu v nekonečné rovinné ozvučnici platí

$$\eta(\alpha) = \frac{2J_1(kR \sin(\alpha))}{kR \sin(\alpha)}, \quad (3.2)$$

kde J_1 je Besselova funkce prvního druhu, prvního řádu, α úhel odklonu od referenční osy, k vlnové číslo a R poloměr membrány. Normalizovaná směrová funkce je poté [15]

$$20 \log |\eta(\alpha)|. \quad (3.3)$$

Z rovnice 3.2 je zřejmé, že směrová funkce závisí pouze na úhlu α , vlnovém čísle k a poloměru membrány R . Proto bude parametrem studie součin kR , kde

R je konstanta ($R = 4$ palce¹). Jinými slovy, výsledky budou budou srovnány pro různé kmitočty odpovídající jednotlivým hodnotám vlnového čísla k . Membrána bude vsazena do nekonečné rovinné ozvučnice a její vlastnosti budou idealizovány – bude dokonale tuhá a nehmotná (nebude mít konečnou tloušťku).

3.1.1 Postup

Nejprve jsem definoval globální parametry v uzlu *Global*. Některé z nich jsou vypsány v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Výčet části globálních parametrů, model membrán.

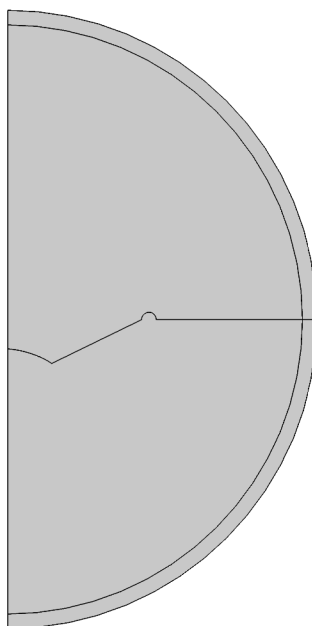
Název	Hodnota	Popis
R	4 palce	poloměr membrány
kR	0,5	součin vlnového čísla a poloměru membrány
k	$k = kR/R$	vlnové číslo
λ	$2\pi/k$	vlnová délka
v_a	343 m/s	rychlost zvuku ve vzduchu
f	v_a/λ	frekvence

Vhodné je také definování dalších rozměrů, které se budou v geometriích jednotlivých komponentů (membrán) opakovat.

Nyní přichází na řadu **tvorba geometrie**. Ta se vždy bude skládat ze dvou rovinných prvků – vlastní membrány a ozvučnice, do které je membrána vsazena, a jednoho objemového prvku – koule, která tyto bude obklopotvat a určí konečné rozměry výpočetní oblasti. Toto je nutností v případě použití numerické metody MKP. Poloměr koule $r_s = 20$ cm je dostatečná vzdálenost na analýzu blízkého pole membrány. V případě eliptické membrány jsem použil 3D komponent, ve všech ostatních případech jsem díky osové symetrii membrán mohl využít osově symetrický 2D komponent, ve kterém se geometrie kreslí v rovině určené osami z a r v rámci válcové soustavy souřadnic (viz obr. 3.1). V této rovině také dochází k výpočtu a výsledky jsou následně přiřazeny všem úhlům souřadnice φ . Konkrétní **postup** tvorby geometrie popíšu na příkladu eliptické membrány:

- vytvoření povrchu kužele, jehož základny jsou kolmé na osu z , pomocí příkazu *Eccentric Cone*,
- ozrcadlení tohoto povrchu podle roviny xy pomocí příkazu *Mirror*, aby membrána vyzařovala v kladném směru osy z ,

¹Pro eliptickou membránu tento rozměr odpovídá hlavní poloose elipsy, vedlejší poloosa má rozměr 3 palce.



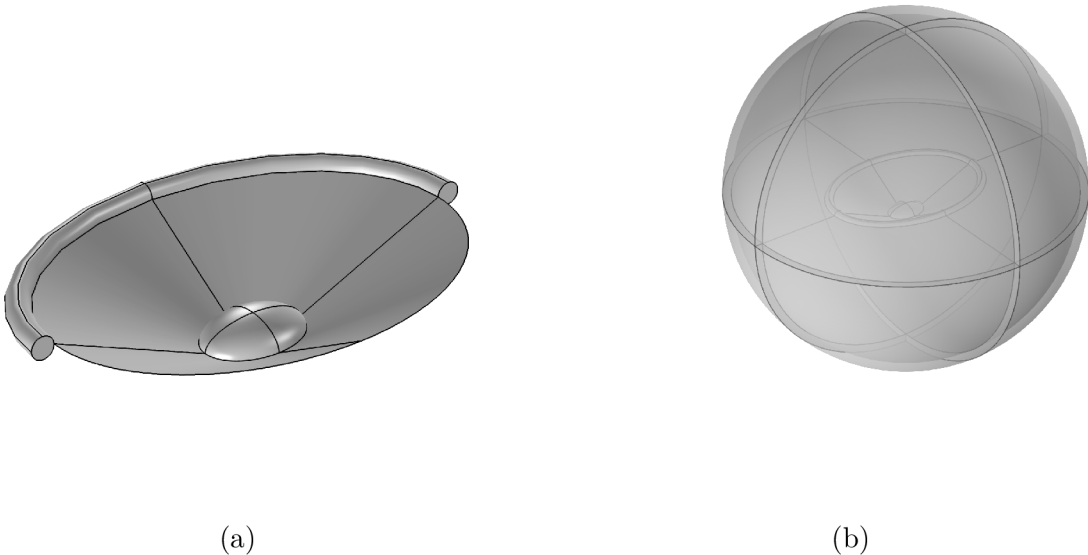
Obr. 3.1: Příklad finální geometrie osově symetrického 2D komponentu: membrána rozvinutelného tvaru kruhového průřezu v rovinné ozvučnici.

- vytvoření pracovní roviny xy pomocí příkazu *Work Plane* a následné použití příkazu *Partition Objects* pro rozdělení kužele na dvě části (vytvoření komolého kužele),
- odebrání horní části kužele, která vznikla v předchozím kroku, pomocí příkazu *Delete Entities*,
- vytvoření povrchu elipsoidu se středem v rovině horní podstavy komolého kužele pomocí příkazu *Ellipsoid*,
- odebrání ploch povrchu elipsoidu, které se nachází vně komolého kužele, pro zachování pouze plochy tvořící uzavírací vložku,
- vytvoření pracovní roviny v rovině xz a v ní vytvoření kruhu (příkaz *Circle*), jehož část bude později tvořit horní závěs membrány,
- tažení vytvořeného kruhu podél obvodu větší podstavy komolého kužele pomocí příkazu *Sweep*²(viz obr. 3.2a),
- odebrání ploch vzniklého tělesa, které nevytváří horní závěs membrány,
- vytvoření pracovní roviny v rovině xy a v ní vytvoření kruhu a elipsy (příkaz *Ellipse*), jejichž rozdíl vytvořený pomocí příkazu *Difference* bude tvořit rovinnou ozvučnici,
- vytvoření koule pomocí příkazu *Sphere* a jednu její vnitřní vrstvu³ (záložka

²Tento příkaz je potřeba provést dvakrát, protože neumožňuje tažení po uzavřené křivce.

³K této vrstvě bude později přiřazena PML.

- *Layers* v nastavovacím okně *Settings*), která bude definovat výpočetní oblast,
- spojení geometrie příkazem *Form Union*.



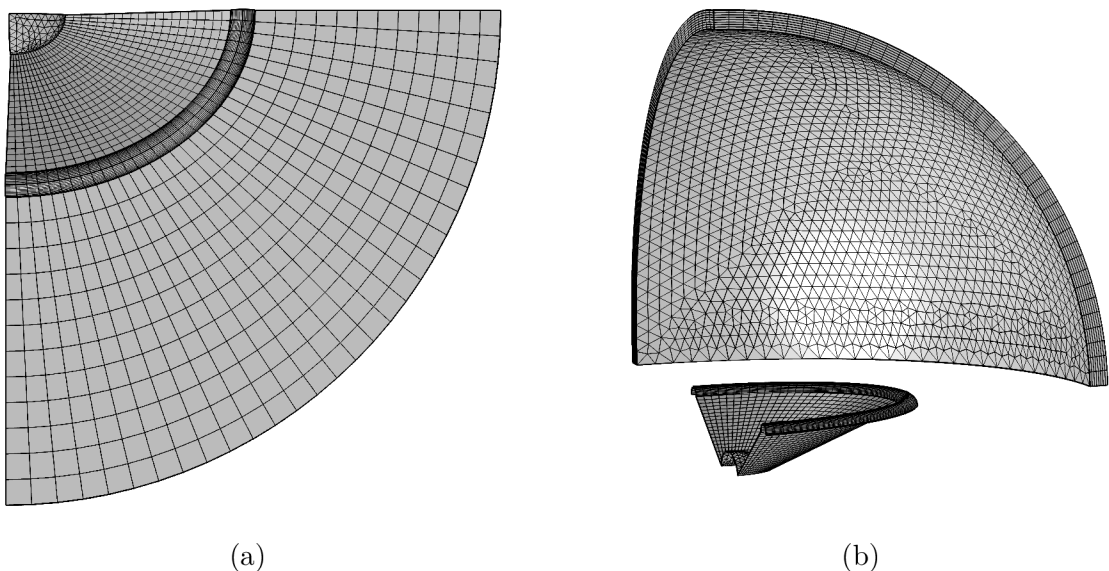
Obr. 3.2: Rozpracovaná (a) a finální (b) geometrie eliptické membrány v rovinné ozvučnici.

Dále následuje **definice materiálů** ve výpočetní oblasti. Jediným materiálem vystupujícím v tomto modelu je vzduch, který jsem vybral z materiálové knihovny (*Add Material from Library*). Z uloženého výčtu mnoha fyzikálních veličin, které charakterizují daný materiál, si fyzikální rozhraní automaticky vybere ty, které bude potřebovat k výpočtu – v tomto případě pouze rychlost zvuku a hustotu.

Následující uzel modelu obsahuje **fyzikální rozhraní**. Protože nás bude zajímat ustálený stav akustického tlaku, zvolil jsem rozhraní *Pressure Acoustics, Frequency Domain*. Jako matematický model prostředí jsem určil model *Linear Elastic*, s nastavením teploty 293,15 K. Dále jsem přiřadil ploše představující ozvučnici okrajovou podmínku *Interior Sound Hard Boundary*, která zajistí, že se obě dvě strany plochy budou chovat jako dokonale tuhé stěny. Rozkmitání částic na ploše tvořící membránu jsem zajistil okrajovou podmínkou vektoru akustické rychlosti *Interior Normal Velocity* ve směru osy z , kterému jsem určil amplitudu 0,008 m/s. Dále jsem přiřadil vnitřní vrstvu polokoule příkazu *Exterior Field Calculation*, který pro plochu uzavírající objem, ve kterém se nachází zdroj zvuku, počítá Helmholtzův-Kirchhoffův integrál, a tak je možné určit akustický tlak v libovolném místě mimo výpočetní oblast. Protože model obsahuje ozvučnici, která prostor rozděluje na dvě oddělené části, příkaz *Exterior Field Calculation* nelze aplikovat na celou vnitřní vrstvu koule

– hodnoty výpočtu ze zadní strany membrány by ovlivňovaly hodnoty výpočtu ze strany přední – proto je třeba příkaz aplikovat pouze na vnitřní vrstvu dané polokoule a určit podmínku symetrie v rovině $z = 0$. Nyní zbývá přiřadit objemu mezi vnitřní vrstvou a povrchem koule virtuální doménu PML (viz 2.2.1).

Dalším bodem je **nastavení sítě**. Zvolil jsem možnost uživatelského nastavení, abych mohl určit jak druhy elementů sítě, tak jejich jemnost. Následný popis odpovídá síti vyobrazené na obr. 3.3. Pro vlastní membránu, její horní závěs a ozvučnici jsem zvolil strukturovanou síť *Mapped* a její jemnost nastavil pomocí příkazu *Distribution*, pro uzavírací vložku a povrch koule síť trojúhelníkovou. Pro domény, ke kterým je přiřazena PML, je využita strukturovaná síť *Swept*, která v tomto případě zdrojovou síť definovanou na povrchu koule zkopíruje na její vnitřní vrstvu. Navíc se dá pomocí příkazu *Distribution* nastavit, kolik elementů na průřezu této vrstvy vznikne (neboli kolikrát se daná síť v daném objemu zkopíruje) – dle [11] je při výchozím nastavení PML doporučeno 8 elementů. Na zbytek objemu jsem použil typ sítě *Tetrahedral* složenou ze čtyřstěnů. Největší rozměr elementu sítě pro tento objem (lokální uzel *Size*) jsem optimalizoval na nejvyšší analyzovanou frekvenci jako osminu vlnové délky, která této frekvenci odpovídá – $h_{\max} = 343 \text{ (m/s)} / (5500 \text{ Hz}) / 8$. Navíc jsem vytvořil tenkou vrstvu před vrstvou PML pomocí příkazu *Boundary Layer*, díky které se elementy v dané oblasti zmenší, a tím se zpřesní výpočet *Exterior Field Calculation*.

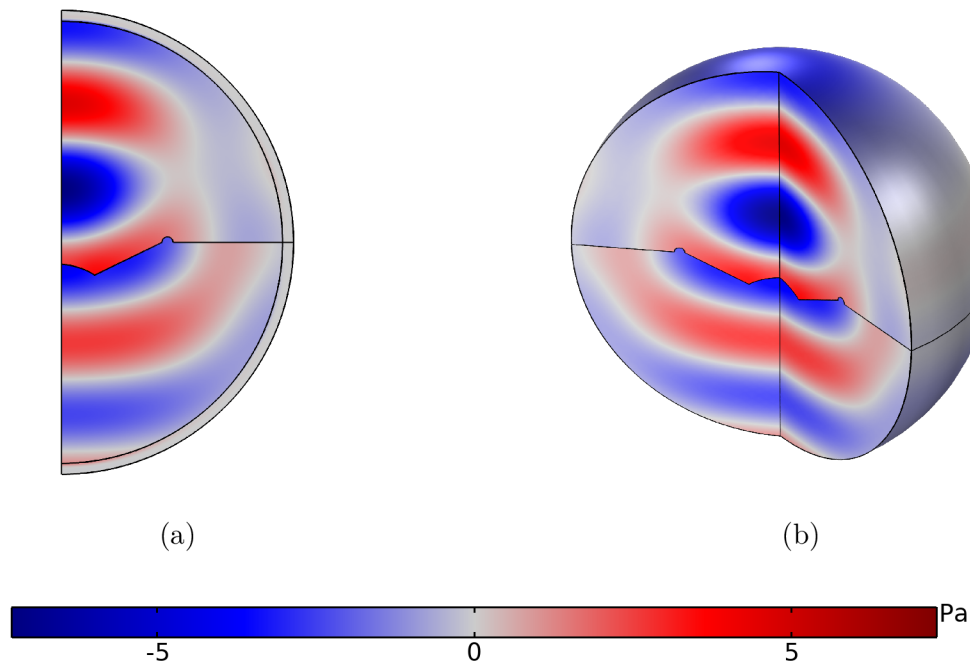


Obr. 3.3: Kombinace strukturované a nestrukturované (trojúhelníkové) sítě na povrchu membrány a ozvučnice (a) a strukturovaná síť *Swept* použitá na diskretizaci domény PML (b).

Po nastavení sítě je třeba nastavit **parametry výpočtu** v uzlu *Study*. Jako typ studie jsem zvolil *Frequency Domain* pro výpočet odezvy modelu na harmonický signál ve frekvenční oblasti [10]. V jejím nastavovacím okně jsem jako analyzovanou frekvenci zvolil parametr f . Dále jsem pod uzel *Study* přidal funkci *Parametric Sweep*, která umožní měnit hodnoty libovolnému parametru dříve definovanému v uzlu *Global* – zde jsem přiřadil parametr kR a jeho hodnoty nastavil na 0,5, 3, 5 a 10, které pro modelovaný průměr membrány 8 palců odpovídají frekvencím 269 Hz, 1,6 kHz, 2,7 kHz a 5,4 kHz, v pořadí. Na základě globálních definic v uzlu *Global* se bude f měnit v závislosti na parametru kR .

3.1.2 Výsledky

Po vypočtení studie přichází na řadu zpracování výsledků. Obrázek 3.4 znázorňuje akustický tlak ve výpočetní oblasti pro $kR = 5$ u membrány rozvinutelného tvaru kruhového průřezu. Na obr. 3.4a lze krásně vidět funkčnost PML, která zvukové vlnění za hranicí vnitřní vrstvy koule pohltí. Obr. 3.4b potom zobrazuje ten samý výsledek orotovaný podle osy z . Navíc je zde doména PML schována pomocí výběrové funkce *Selection*.



Obr. 3.4: Akustický tlak ve výpočetní oblasti pro $kR = 5$, rozvinutelný tvar, typ množiny výsledků: *Solution* (a) a *Revolution 2D* (b).

Tab. 3.2: Simulované frekvence, model membrán.

kR	0,5	3	5	10
f	269 Hz	1,6 kHz	2,7 kHz	5,4 kHz

Tabulka 3.2 přehledně zobrazuje simulované frekvence, tj. frekvence odpovídající 8palcové membráně. Pokud by membrána měla průměr 1 palec, což je relevantní v případě kopulovitého tvaru, uvedeným hodnotám parametru kR by odpovídaly frekvence 2,1 kHz, 12,9 kHz, 21,5 kHz a 43 kHz, v pořadí.

Zvukové pole ve Fresnelově prostoru

V úvodním popisu bylo zmíněno, že se v blízkosti membrány očekává nehomogenní zvukové pole. Toto výsledky simulace potvrdily. Na jednotlivých grafech je vykreslena hladina akustického tlaku, pro kterou platí

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (3.4)$$

kde p je akustický tlak vypočítaný v simulaci a p_0 je referenční hodnota akustického tlaku s hodnotou $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Abych byl u osově symetrického komponentu schopen zobrazit řez membránou tak, jak je v níže přiložených grafech, na množinu výsledků *Revolution 2D*, která výsledky otáčí podle osy z , jsem použil funkci *Cut Plane 3D*, která z nich vybere hodnoty v definované rovině.

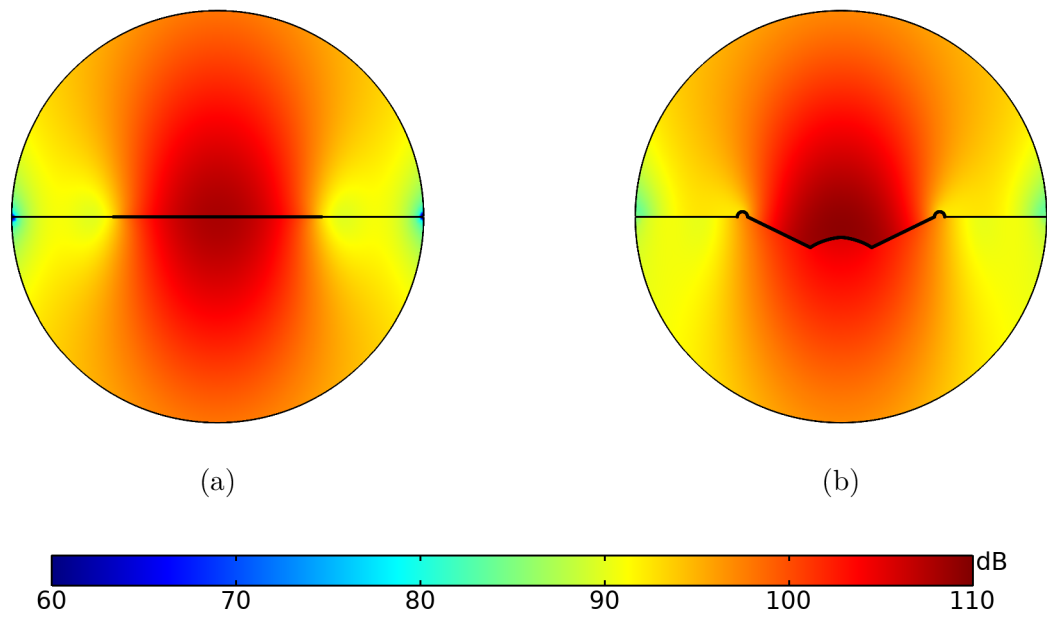
Obrázky 3.5 a 3.6 srovnávají blízká pole pro $kR = 3$ a $kR = 5$ kruhového pístu a rozvinutelného tvaru membrány kruhového průřezu. V prvním případě je vliv geometrie na zvukové pole minimální. Naproti tomu ve druhém pozorujeme rozdílný tvar vyzařovací laloky. Na obr. 3.6b je navíc patrný výrazný pokles hladiny akustického tlaku přibližně 7 cm před okrajem membrány.

Srovnání blízkého pole rozvinutelného tvaru membrány kruhového průřezu (3.7a) a kopulovitého tvaru (3.7b) pro $kR = 10$ zachycuje obr. 3.7. Zatímco na obr. 3.7a je zvukové pole silně nehomogenní se zřejmým hlavním a dvěma postranními laloky, ve zvukovém poli na obr. 3.7b se žádné vyzařovací laloky nevyskytují a pole je spíše homogenní.

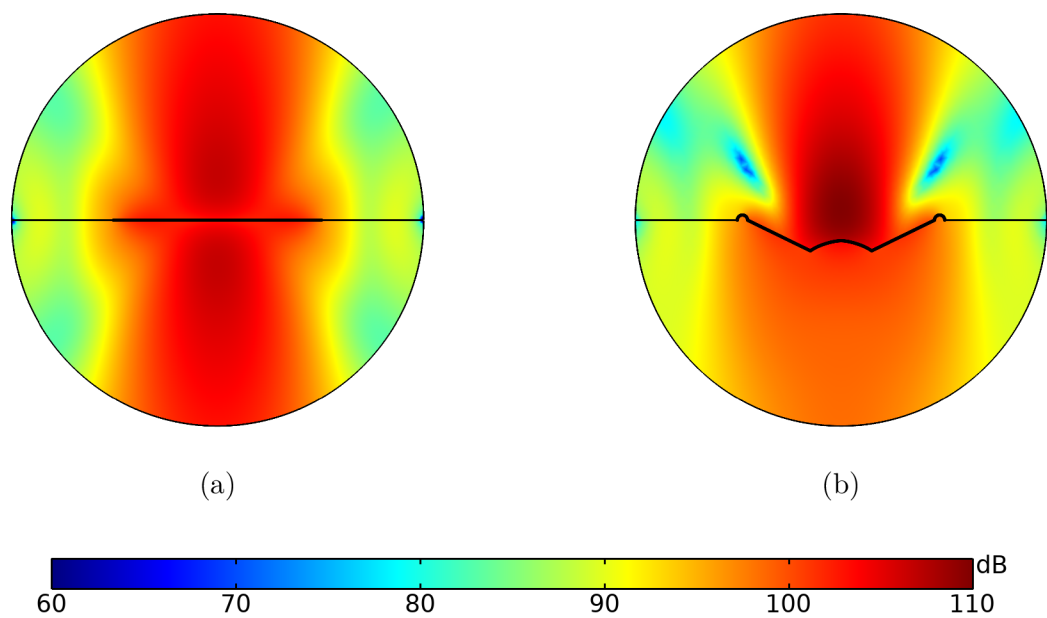
Obr. 3.8 zobrazuje blízké pole parabolického (3.8a) a hyperbolického (3.8b) tvaru membrány kruhového průřezu. Hyperbolický tvar má ve srovnání s parabolickým užší hlavní vyzařovací lalok a k výraznému poklesu hladiny akustického tlaku dochází na jiných místech.

Kompletní srovnání zvukového pole jednotlivých geometrií v závislosti na parametru kR se nachází v příloze A. Ve srovnání chybí geometrie eliptické membrány

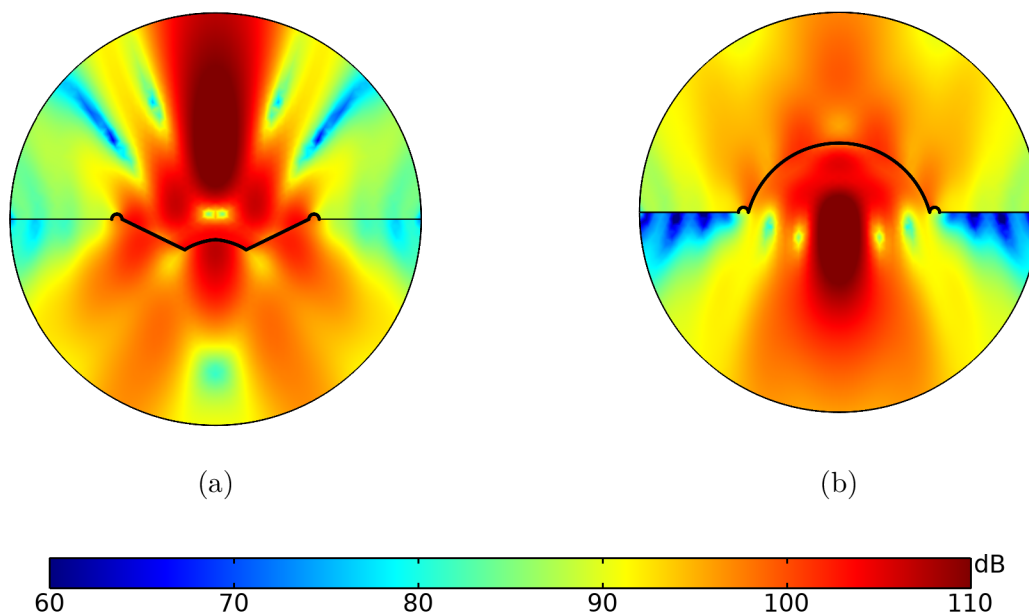
– její zvukové pole je v řezu shodná s membránou rozvinutelného tvaru kruhového průřezu.



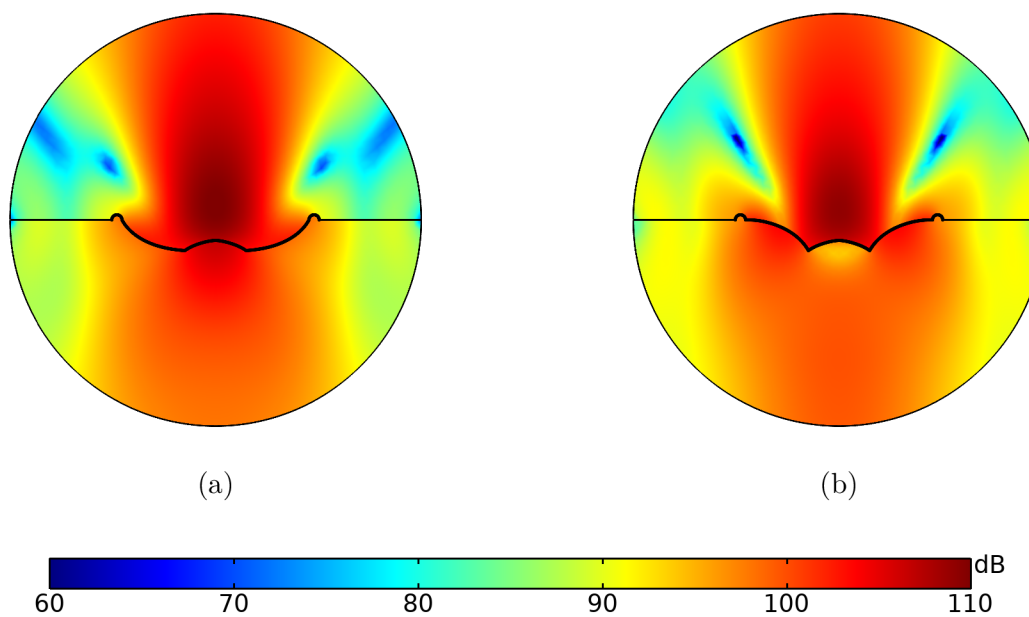
Obr. 3.5: Hladina akustického tlaku pro $kR = 3$, píst (a) a rozvinutelný tvar (b).



Obr. 3.6: Hladina akustického tlaku pro $kR = 5$, píst (a) a rozvinutelný tvar (b).



Obr. 3.7: Hladina akustického tlaku pro $kR = 10$, rozvinutelný tvar (a) a kopulovitý tvar (b).



Obr. 3.8: Hladina akustického tlaku pro $kR = 5$, parabolický tvar (a) a hyperbolický tvar (b).

Směrové charakteristiky ve vzdáleném poli

Směrové charakteristiky jsou vykresleny z hodnot ve vzdálenosti 1 m od referenčního bodu membrány⁴. Tato vzdálenost splňuje vztah 3.1 pro všechny uvažované hodnoty parametru kR kromě $kR = 10$, pro kterou by tato vzdálenost měla být $x \geq 1,3$ m. Protože jsem však zjistil, že se směrové charakteristiky v těchto dvou vzdálenostech téměř neliší a 1 m je typická vzdálenost pro měření parametrů reproduktoru, právě tuto vzdálenost jsem zvolil. Zobrazenou veličinou je hladina akustického tlaku pro úhel odklonu od referenční osy membrány, která je normována k akustickému tlaku na referenční ose – $L_p(\alpha) = 20 \log(p(\alpha)/p(0^\circ))$. Hodnoty jsou získány pomocí funkce *Exterior Field Calculation*.

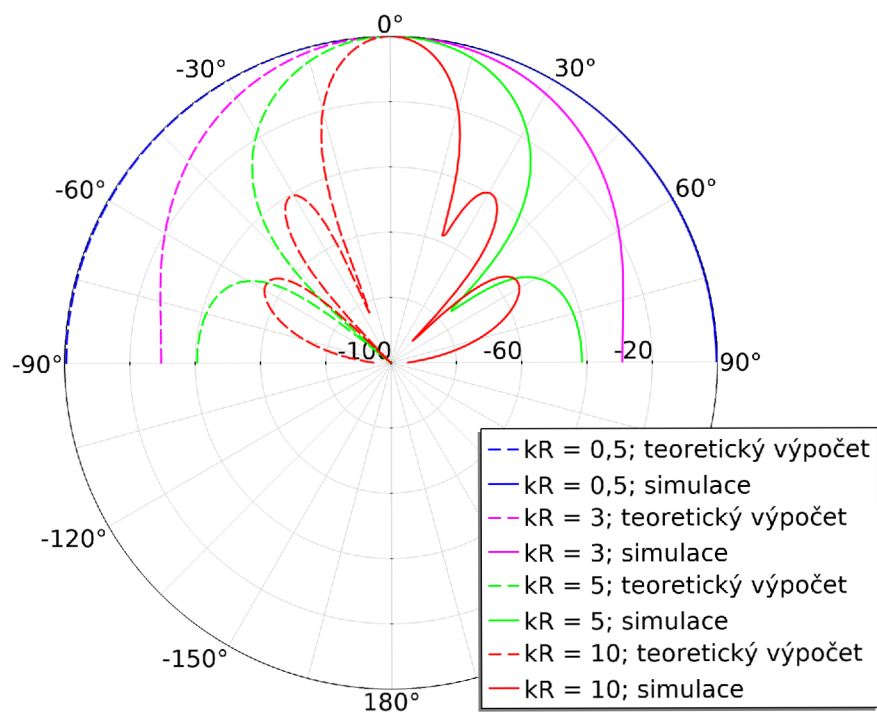
Na obr. 3.9 je zobrazena simulovaná směrová charakteristika kruhového pístu současně s teoretickým výpočtem dle rovnice 3.3⁵. Pokud je $kR < 0,5$, píst vyzařuje všesměrově. Pro vyšší hodnoty kR píst začíná vyzařovat směrově – čím vyšší je frekvence reprodukováného signálu, tím vyšší je také směrovost pístu. Pokud je $kR \geq 5$, ve směrové charakteristice se začínají objevovat postranní laloky. Z obrázku 3.9 je také patrné, že se simulace s analytickým výpočtem téměř shoduje, což potvrzuje správnost výsledků simulace. Rozdílná hodnota hladiny akustického tlaku v oblastech minim je pravděpodobně způsobena konečnou přesností výpočtu závisící na jemnosti zvolené sítě.

Obr. 3.10 srovnává směrovou charakteristiku kruhového pístu a membrány rozvinutelného tvaru kruhového průřezu. Je patrné, že pro $kR \leq 3$ je charakteristika téměř shodná, pro vyšší kmitočty kuželovitý tvar membrány snižuje její směrovost. Obr. 3.11 zachycuje rozdíl směrových charakteristik mezi tvary kuželovitých membrán kruhového průřezu. Tyto se začínají mírně lišit pro $kR \geq 5$ úhly odklonu od referenční osy, na kterých se nacházejí minima. Současně je rozdílná i hloubka těchto minim. Nejvýraznější minimum vzniká u hyperbolického tvaru pro $kR = 10$ pod úhlem $\alpha = 50^\circ$. Směrové charakteristiky kopulovité membrány jsou vyobrazeny na obr. 3.12. Vzrůstající hodnota parametru kR ovlivňuje směrovost kopulovité membrány ve srovnání s ostatními tvary membrán minimálně.

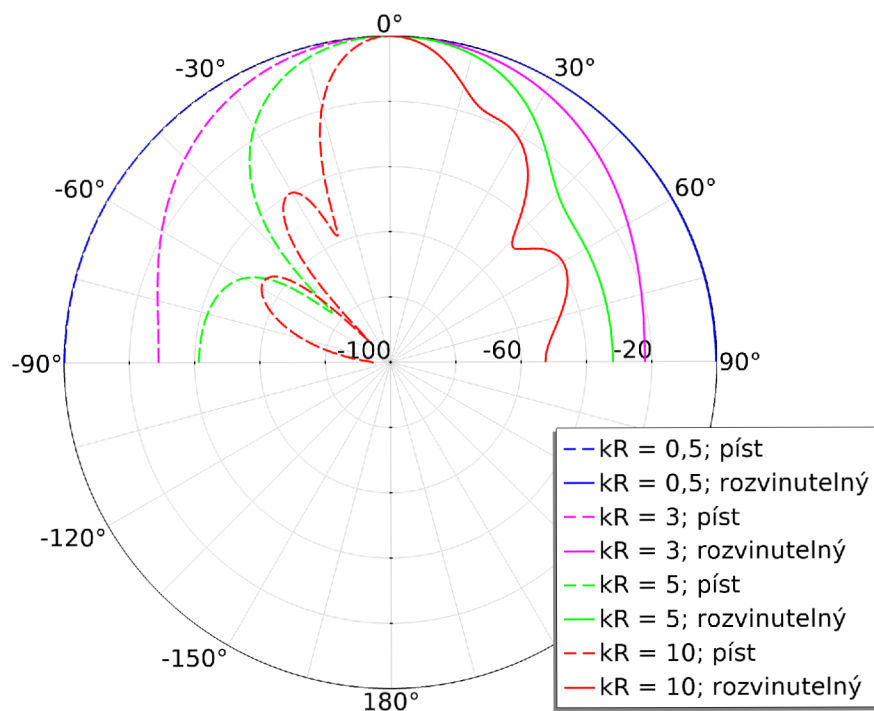
Obrázek 3.13 porovnává směrovou charakteristiku eliptické membrány závisící na jejím natočení. Do $kR = 5$ je směrová charakteristika ovlivněna natočením pouze minimálně. Pokud je však $kR = 10$, natočení hlavní osy elipsy kolmo na horizontální rovinu („nastojato“) způsobí výrazně nižší projev směrovosti membrány než v případě, že je hlavní osa elipsy orientována rovnoběžně horizontální rovinou („naležato“). K největšímu rozdílu dochází pod úhlem $\alpha = 50^\circ$, kde se nachází ostré minimum pouze ve směrové charakteristice membrány orientované „naležato“.

⁴Ten je určen jako průsečík roviny ozvučnice a referenční osy membrány.

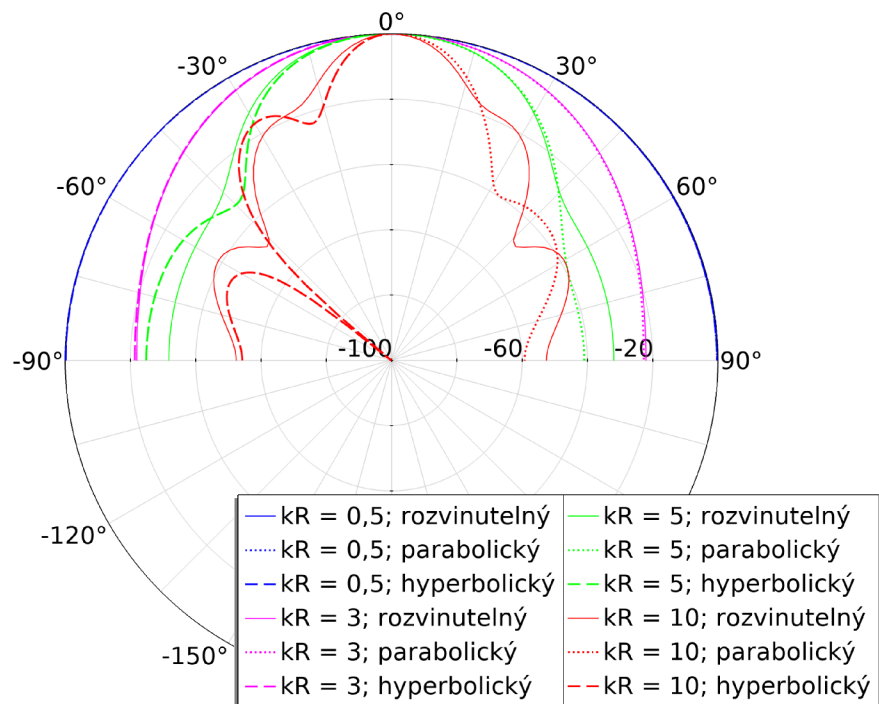
⁵Teoretický výpočet lze zobrazit pomocí grafu typu *Global*.



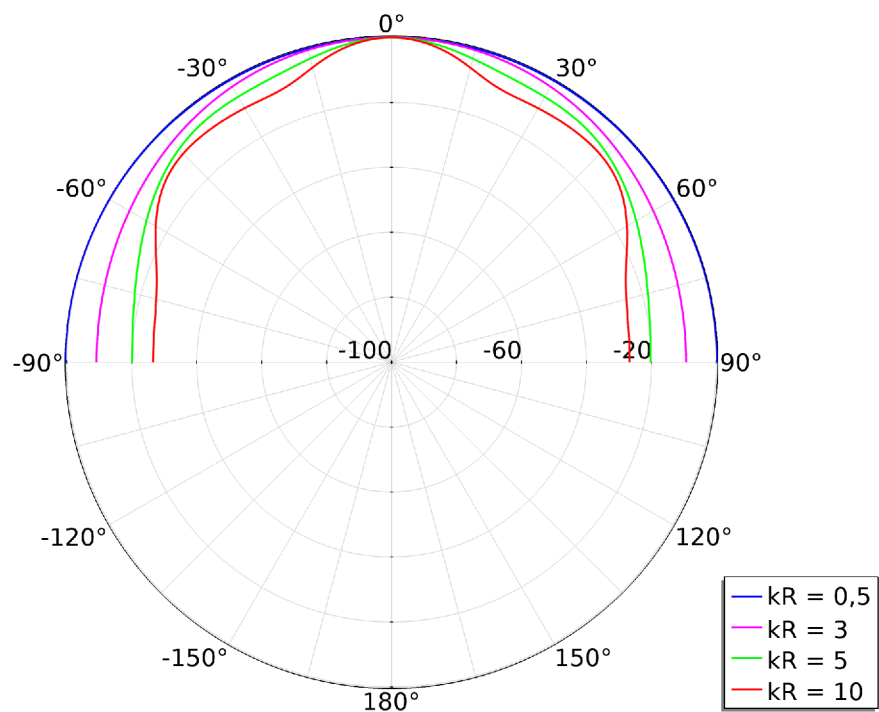
Obr. 3.9: Směrová charakteristika kruhového pístu: teoretický výpočet versus simulace.



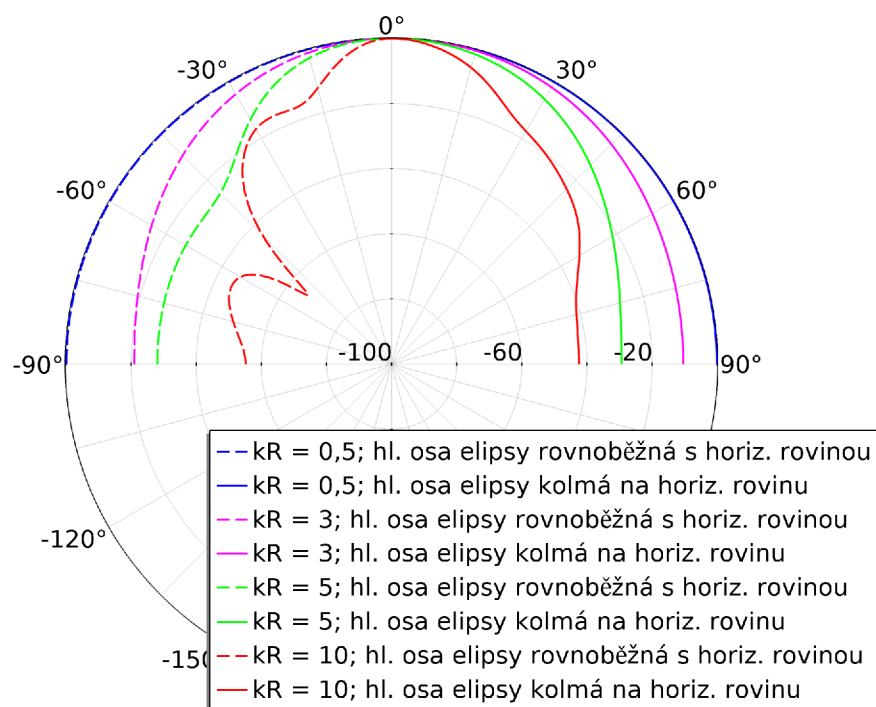
Obr. 3.10: Srovnání směrové charakteristiky kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu.



Obr. 3.11: Srovnání směrové charakteristiky kruhového rozvinutelného, kruhového konvexního a kruhového konkávního tvaru membrány.



Obr. 3.12: Směrová charakteristika kopulovitého tvaru membrány.



Obr. 3.13: Srovnání směrové charakteristiky eliptického tvaru membrány v závislosti na jejím natočení.

3.1.3 Frekvenční charakteristiky ve vzdálenosti 1 m

Jak jsem zmínil v úvodu této podkapitoly, dále prezentované výsledky nepocházejí z již popsaného modelu ale z modelu, který z toho popsaného převážně vychází. Proto jsem se rozhodl přidat tuto simulaci do této podkapitoly. Nyní stručně popíši, v čem se tento model liší a rozeberu výsledky.

Z představeného modelu jsem převzal geometrii kruhového pístu, nerozvinutelného tvaru kruhového průřezu a kopulovitého tvaru. U prvně zmíněných dvou tvarů jsem ponechal rozměr $R = 4$ palce (tedy průměr membrány – $D = 8$ palců) a přidal jeden navíc s průměrem $D = 4$ palce tak, aby poměry jednotlivých vzdáleností geometrie zůstaly zachovány⁶. Stejným způsobem jsem upravil rozměr kopulovitého tvaru na $D = 2$ palce. Fyzikální rozhraní je zde nastaveno stejně kromě okrajové podmínky zajišťující buzení membrány – zde jsem vybral vektor akustického zrychlení *Interior Normal Acceleration* zajišťující v konkrétním budě prostoru konstantní hladinu akustického tlaku nezávisle na frekvenci. Shodně je nastavena i síť pro jednotlivé geometrie.

Typ studie pro tento model je také *Frequency Domain* s funkcí *Parametric Sweep*. V ní jako parametr nevystupuje kR ale frekvence $f \in \langle 20 \text{ Hz}, 100 \text{ kHz} \rangle$ pro

⁶Pro geometrii kruhového pístu jsem přidal ještě rozměr $D = 2$ palce.

$D = 8$ palců a $f \in \langle 20 \text{ Hz}, 400 \text{ kHz} \rangle$ pro $D = 4$ palce a $D = 2$ palce s krokem $1/12$ oktávy.

Frekvenční charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 3.14 až 3.16. Na každém grafu jsou srovnány průběhy pro stejné průměry membrán vždy pro kruhový píst a komplexní geometrii ve variantě bez a včetně horního závěsu. Na vertikální ose je vynesena hladina akustického tlaku, která je normována k hladině akustického tlaku vyzářené kruhovým pístem na nízkých kmitočtech (modrá křivka).

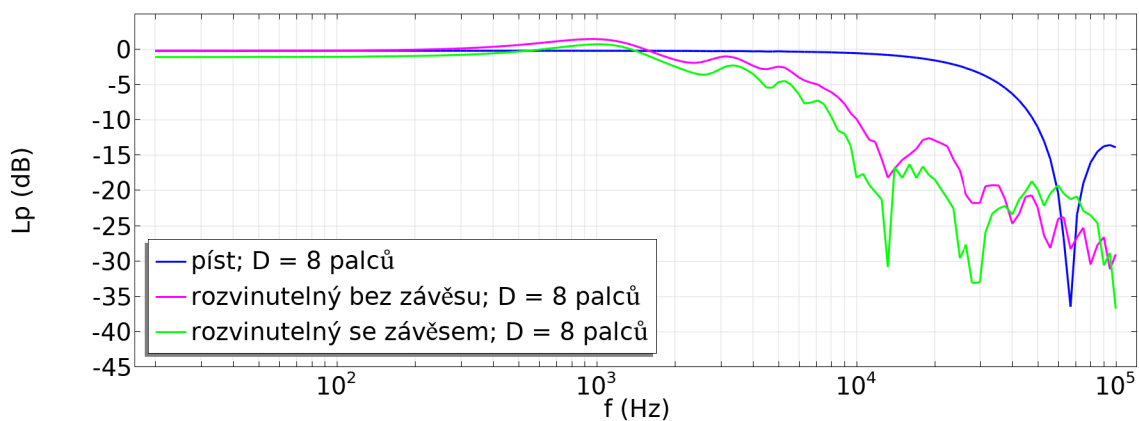
Na obr 3.14 jsou vyobrazeny frekvenční charakteristiky pro 8palcovou membránu tvaru kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu. V případě pístu je přibližně do 5 kHz hladina akustického tlaku konstantní, poté začíná pozvolna klesat. Na přibližně 66,6 kHz se nachází maximální pokles o více než 36 dB. Tato frekvence odpovídá vlnové délce, která má velikost rovnu rozdílu vzdáleností úseček střed membrány-pozorovaný bod (1 m) a okraj membrány-pozorovaný bod.

Příčinou poklesu ve frekvenční charakteristice je proměnný fázový rozdíl vlnění od příspěvků jednotlivých elementů membrány vztažený k 1 m. Právě na frekvenci 66,6 kHz je největší podíl elementů s fázovým rozdílem π . Tento fázový rozdíl mezi jednotlivými elementy je proměnný, protože na takto vysokých frekvencích už vzdálenost 1 m nesplňuje podmínku 3.1 pro vzdálené pole, dle které je platné přibližně do frekvence 4,5 kHz. Tomu přesně výsledky odpovídají – frekvenční charakteristika je do této frekvence rovná.

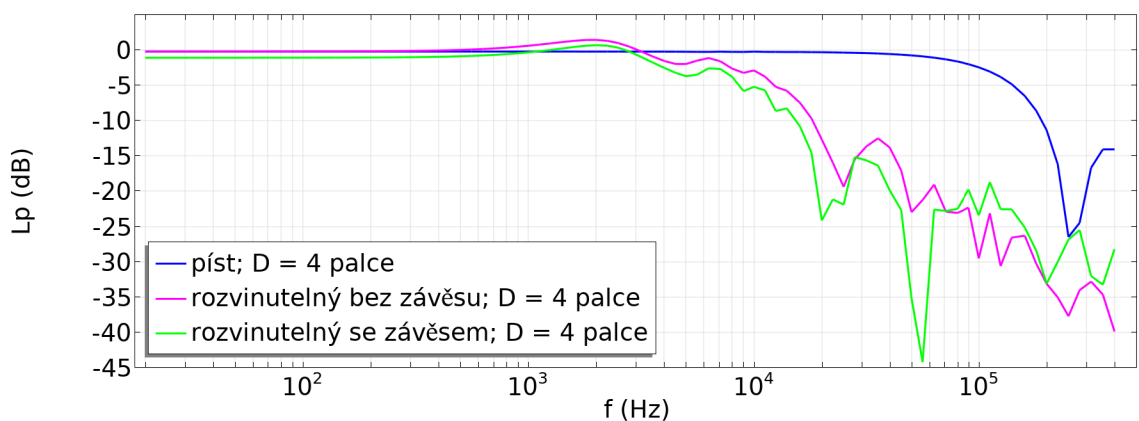
Pokud jde o rozvinutelný tvar kruhového průřezu bez závěsu, hladina akustického tlaku je konstantní do 300 Hz, kde začíná mírně narůstat. Na 1 kHz je poté vrchol s hodnotou 2 dB. Od této hodnoty začíná hladina akustického tlaku klesat v průměru s 20 dB/dekádu, s tím, že se v průběhu objevují lokální minima a maxima, které jsou od sebe přibližně vzdáleny o více než oktávu. V případě geometrie s horním závěsem je průběh velice podobný přibližně do 4 kHz, poté hladina akustického tlaku začíná rychleji klesat, lokální minima jsou výraznější v průměru o 10 dB a nacházejí se dál od sebe.

Obr 3.15 zachycuje stejné geometrie pro 4palcovou membránu. Průběhy jsou si velmi podobné, akorát jsou dané jevy posunuty na vyšší frekvence úměrně velikosti membrány. U charakteristiky kruhového pístu se na frekvenci 267 kHz nachází pokles o 26 dB, což je o 10 dB méně než v případě 8palcového pístu. Charakteristiky rozvinutelného tvaru kruhového průřezu mají maximum na 2 kHz, poté dochází k poklesu. Průběh charakteristiky geometrie bez horního závěsu se podobá průběhu u 8palcové membrány, průběh charakteristiky geometrie s horním závěsem už se liší – v charakteristice je velmi výrazný propad o téměř 45 dB na frekvenci 54 kHz.

Obrázek 3.16 srovnává frekvenční charakteristiku 2palcového kruhového pístu a kopulovité membrány. U kruhového pístu stihne v daném rozsahu frekvencí hladina akustického tlaku poklesnout pouze o 3 dB. Charakteristika kopulovitého tvaru



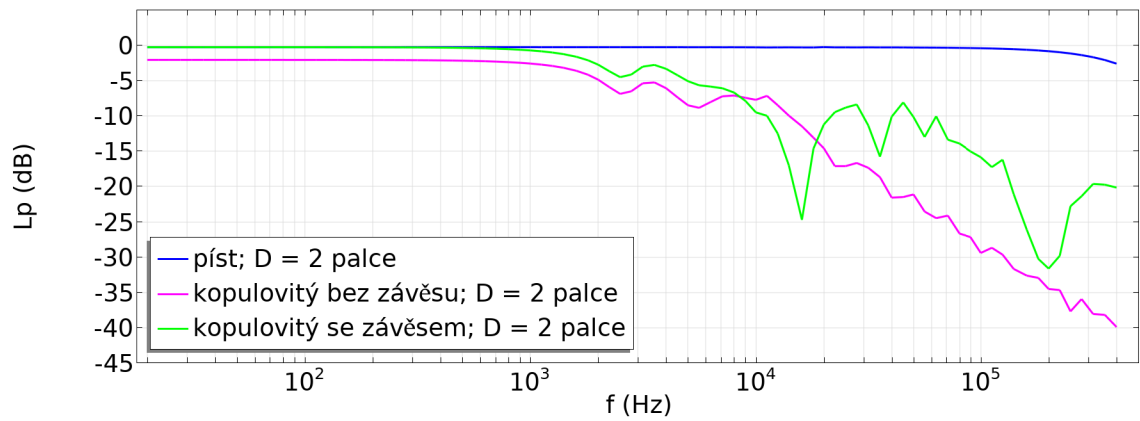
Obr. 3.14: Srovnání frekvenční charakteristiky membrány tvaru kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu pro $D = 8$ palců.



Obr. 3.15: Srovnání frekvenční charakteristiky membrány tvaru kruhového pístu a rozvinutelného tvaru kruhového průřezu pro $D = 4$ palce.

bez horního závěsu má o 2 dB nižší hodnotu na nízkých kmitočtech, do kmitočtu 1 kHz je průběh konstantní, následně začíná klesat s 10 dB/dekádu. I zde dochází k viditelnému zvlnění, které je však přítomné v mnohem menší míře než v případě rozvinutelného tvaru kruhového průřezu. Pokud kopulovitý tvar obsahuje také horní závěs, k poklesu na nízkých kmitočtech nedojde. Nižší sklon poklesu na vyšších kmitočtech je vykoupen mnohem výraznějším zvlněním na kmitočtech 17 kHz a 110 kHz.

Je zřejmé, že propady v charakteristikách kruhových pístů na vyšších desítkách až stovkách kHz, tedy výrazně za hranici slyšitelného pásma, jsou z praktického hlediska nevýznamné. Přesto však jejich výskyt na referenční ose membrány může být překvapivý. Naopak zvlněním charakteristik rozvinutelného tvaru v rozsahu frekvencí 300 Hz až 4 kHz pro 8palcovou membránu a 300 Hz až 10 kHz pro 4palcovou membránu v rozsahu 5 až 10 dB v pořadí jistě má cenu se zaobírat. Stejně tak vý-



Obr. 3.16: Srovnání frekvenční charakteristiky kruhového pístu a kopulovitého tvaru membrány pro $D = 2$ palce.

znamný pokles hladiny akustického tlaku u kopulovité membrány za hranicí 1 kHz a především pak propad o 25 dB na 17 kHz u charakteristiky geometrie bez závěsu by při návrhu reproduktorové soustavy s vyrovnaným frekvenčním průběhem sehrál významnou roli.

3.2 Směrové charakteristiky zvukovodů

Josef Merhaut ve své knize [16] zvukovod definuje jako „trubici s tuhými stěnami, do které zvuková vlna jakožto nositel signálu na jedné straně vstupuje a na druhé vystupuje“. Zvukovod transformuje malou plochu membrány reproduktoru (rozměrově srovnatelnou s hrdlem zvukovodu) na násobně větší plochu (ústí zvukovodu). Mění tak vyzařovací impedanci reproduktoru – na téměř rezistivní v požadovaném kmitočtovém pásmu. Výsledkem je vyšší akustický výkon vyzářený na nižších kmitočtech. Současně také geometrie zvukovodu výrazně ovlivňuje směrovou charakteristiku reproduktoru [15], což bude demonstrováno v této simulaci.

Pro simulaci jsem vybral kónický a exponenciální tvar kruhového průřezu. V obou případech geometrii definují tři parametry. Pro kónický tvar je to průměr (či obsah) hrdla a ústí a úhel α , který svírá normála k hrdlu se stěnou zvukovodu, pro exponenciální tvar shodně průměr hrdla a ústí a také koeficient m určující „míru otevřenosti“. Rovnice popisující obsah ústí exponenciálního zvukovodu je následující [15]:

$$S(z) = S_H e^{mz}, \quad (3.5)$$

kde $S(z)$ je obsah ústí ve vzdálenosti z od hrdla, S_H obsah hrdla a m koeficient určující „míru otevřenosti“.

Co se týče rozměrů, inspirací mi byla kapitola 2.19. *Horn Source*. z publikace [17] Harryho F. Olsona. V prvním případě jsem jednoduše řečeno zachovával tvar zvukovodu a pouze měnil jeho velikost. To prakticky znamenalo, že jsem u obou geometrií měnil průměr ústí D , u kónického tvaru jsem poté zachovával konstantní úhel $\alpha = 25,6^\circ$ a k dané hodnotě D jsem dopočítal délku zvukovodu l dle jednoduchého, mnou odvozeného vzorce

$$l = \frac{\frac{D}{2} - \frac{D_H}{2}}{\tan \alpha}, \quad (3.6)$$

kde D je průměr ústí a D_H průměr hrdla. U exponenciálního tvaru jsem vycházel ze stejných hodnot D a l , ale ještě navíc jsem musel dopočítat koeficient m . K výpočtu jsem použil rovnici 3.5. Po dosazení vztahu pro obsah kruhu dostaneme

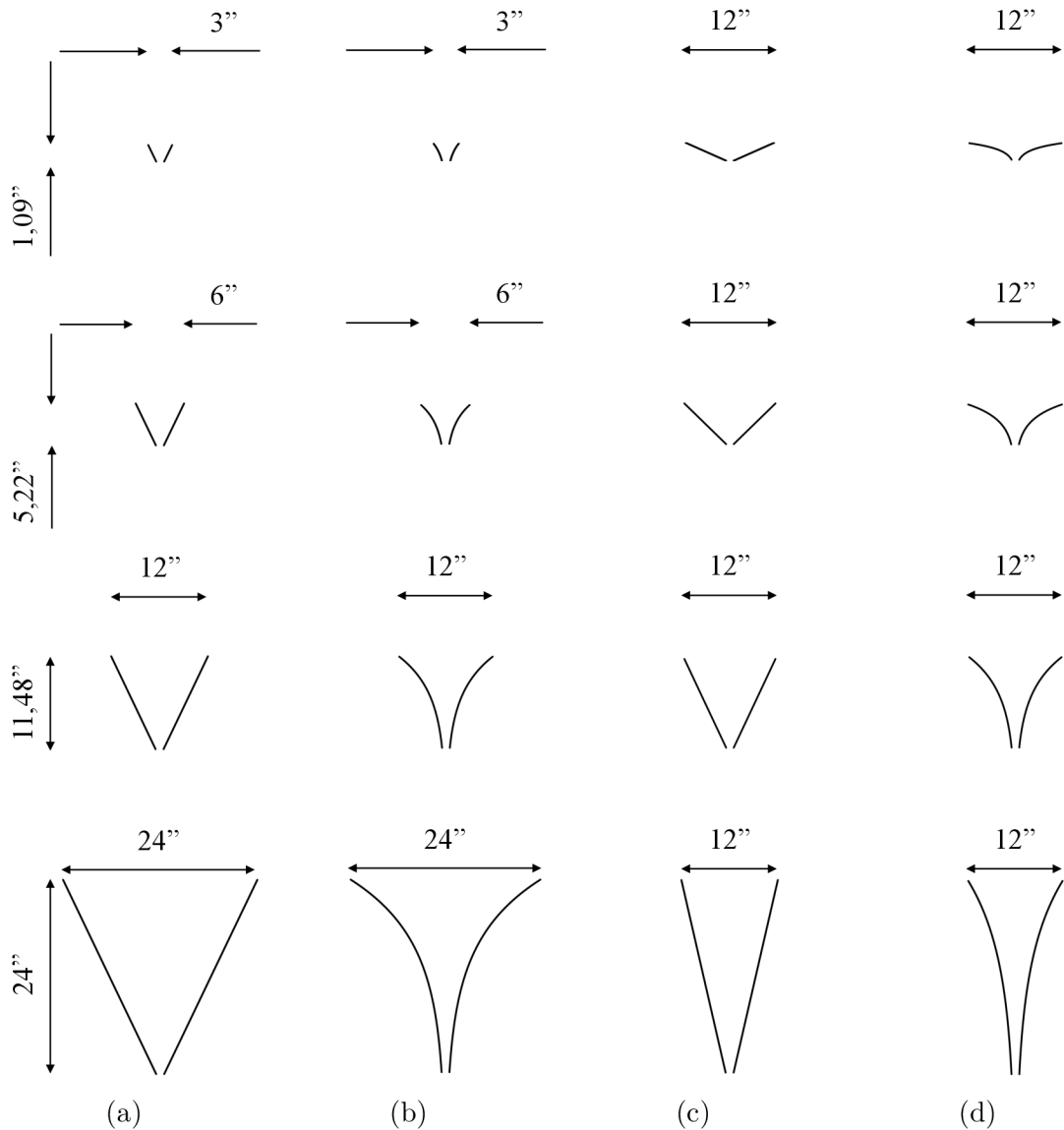
$$\pi \left(\frac{D(z)}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{D_H}{2} \right)^2 e^{mz}, \quad (3.7)$$

po zlogaritmování obou stran rovnice a několika elementárních úpravách můžeme napsat

$$m = \frac{2 \ln \frac{D(z)}{D_H}}{z}. \quad (3.8)$$

V druhém případě jsem zachovával konstantní průměr ústí a použil délku zvukovodu vypočtené pro první případ dle vztahu 3.6. I zde bylo třeba dopočítat koeficient

m dle vztahu 3.8 pro exponenciální tvar zvukovodu. Všechny simulované geometrie jsou zobrazeny na obr. 3.17, průměr hrdla zvukovodu je pro všechny 1 palec.



Obr. 3.17: Řez geometriemi, zachování tvaru pro kónický (a) a exponenciální (b) tvar, konstantní průřez ústí pro kónický (c) a exponenciální (d) tvar.

3.2.1 Postup

Jednotlivé kroky tvorby modelu jsem detailně popsal u předchozí simulace, proto zde vypíchnu pouze ty stěžejní či nové funkce, které ještě použity nebyly.

Abych mohl parametricky měnit geometrii tak, jak je vyobrazena na obr. 3.17, nadefinoval jsem si globální parametry vypsané do tab. 3.3.

Tab. 3.3: Výčet části globálních parametrů, model zvukovodů.

Název	Hodnota	Popis
D	3 palce	průměr ústí zvukvodu
D_{fix}	12 palců	konstantní průměr ústí zvukvodu pro dané geometrie
D_{H}	1 palec	průměr hrdla zvukvodu
l	$\left(\frac{D}{2} - \frac{D_{\text{H}}}{2}\right) / \tan(25,6^\circ)$	délka zvukvodu
m	$2 \ln\left(\frac{D}{D_{\text{H}}}\right) / l$	koeficient pro exponenciální tvar
m_{fix}	$2 \ln\left(\frac{D_{\text{fix}}}{D_{\text{H}}}\right) / l$	koeficient pro exponenciální tvar pro D_{fix}

Princip **tvorby geometrie** je podobný tomu, který byl popsán v kapitole 3.1 – zvukovod jsem vložil do rovinné ozvučnice a oblast, do které bude zvukovod vyzařovat, jsem uzavřel polokoulí. Díky osové symetrii zvukovodu jsem využil osově symetrický 2D komponent. Při tvorbě exponenciálního zvukovodu stojí za zmínku využití funkce *Parametric Curve*, jež vytvoří křivku zadanou funkcí. Využil jsem rovnici 3.7 a z ní vyjádřil vztah pro poloměr ústí zvukovodu:

$$\frac{D(z)}{2} = \frac{D_{\text{H}}}{2} \sqrt{e^{mz}}. \quad (3.9)$$

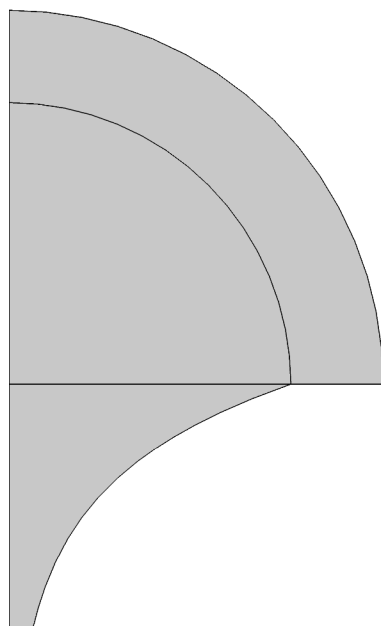
Parametry funkce *Parametric Curve* jsem poté nastavil následovně:

- definice libovolného parametru – $s \in \langle 0, l \rangle$,
- souřadnice $r = D_{\text{H}}/2\sqrt{e^{ms}}$ (s využitím vztahu 3.9),
- souřadnice $z = l$.

Příklad finální geometrie je uveden na obr 3.18.

Jediným **definovaným materiálem** ve výpočetní oblasti je vzduch. Určeným **fyzikálním rozhraním** je *Pressure Acoustics, Frequency Domain* se stejně nastaveným modelem prostředí jako v kapitole 3.1. Správným výchozím nastavením pro všechny vnější hrany geometrie je okrajová podmínka *Sound Hard Boundary*, jako ideální zdroj vlnění v místě hrdla zvukovodu jsem použil okrajovou podmínku *Port*, která vybudí ideální rovinnou vlnu harmonického průběhu. Parametr *Type of port* jsem nastavil na hodnotu *Circular*, s amplitudou buzení 1 Pa. Nakonec jsem ústí zvukovodu přiřadil příkaz *Exterior Field Calculation* s nastavením podmínky symetrie v rovině $z = 0$ a vnitřní vrstvě polokoule virtuální doménu PML. Co se týče **sítě**, na oblast PML jsem použil strukturovanou síť *Mapped*, na zbytek výpočetní oblasti potom typ sítě *Free Triangular*.

Studie je typu *Frequency Domain*, hodnoty analyzovaných frekvencí jsem nastavil na 1, 2, 4, 7, 10 a 20 kHz. Využil jsem také funkci *Parametric Sweep*, které jsem



Obr. 3.18: Příklad finální geometrie: exponenciální tvar, $D = 12$ palců, $\alpha = 46,5^\circ$.

přiřadil parametr D a jeho hodnoty nastavil na 3, 6, 12 a 24 palců. To zajistilo správnou parametrizaci všech geometrií.

3.2.2 Výsledky

Směrové charakteristiky jsou vykresleny z hodnot ve vzdálenosti 1 m od ústí zvukovodu. Zobrazenou veličinou je hladina akustického tlaku pro úhel odklonu od referenční osy, která je normována k akustickému tlaku na referenční ose – $L_p(\alpha) = 20 \log(p(\alpha)/p(0^\circ))$. Hodnoty jsou získány pomocí funkce *Exterior Field Calculation*.

Na obr. 3.19 je zobrazena směrová charakteristika kónického zvukovodu pro dvě velikosti průměru ústí D při konstantním úhlu $\alpha = 25,6^\circ$. Pokud $D = 3$ palce, a tedy vlnová délka zvukového vlnění je větší nebo srovnatelná s D , směrová charakteristika je téměř shodná se směrovou charakteristikou kruhového pístu s průměrem 1,4krát menším než je průměr ústí zvukovodu. Pokud je však vlnová délka výrazně menší než D (7,1krát pro $f = 4$ kHz, $D = 24$ palců), směrová charakteristika se začíná značně měnit a s rostoucím kmitočtem dochází k rozšíření hlavního vyzařovacího laloku. Výskyt tohoto jevu u kónických zvukovodů zmiňuje i Harry F. Olson ve své publikaci [17].

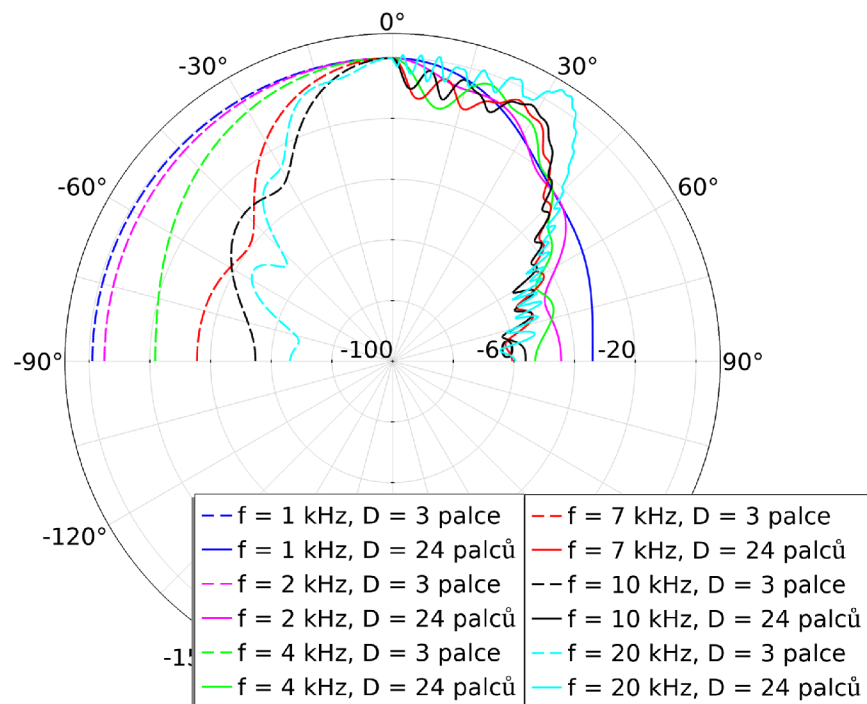
Obr. 3.20 zachycuje směrové charakteristiky pro stejné rozměry D a l jako obr. 3.19, ale pro exponenciální zvukovod. Pro $D = 3$ palce jsou směrové charakteristiky velmi podobné kónickému zvukovodu, avšak s tím rozdílem, že u exponenci-

álního zvukovodu jsou postranní laloky méně výrazné. Pro $D = 24$ palců se směrové charakteristiky těm kónickým nepodobají vůbec a s rostoucím kmitočtem se hlavní vyzařovací lalok proporcionálně zužuje. Postranní laloky zde vůbec nejsou patrné.

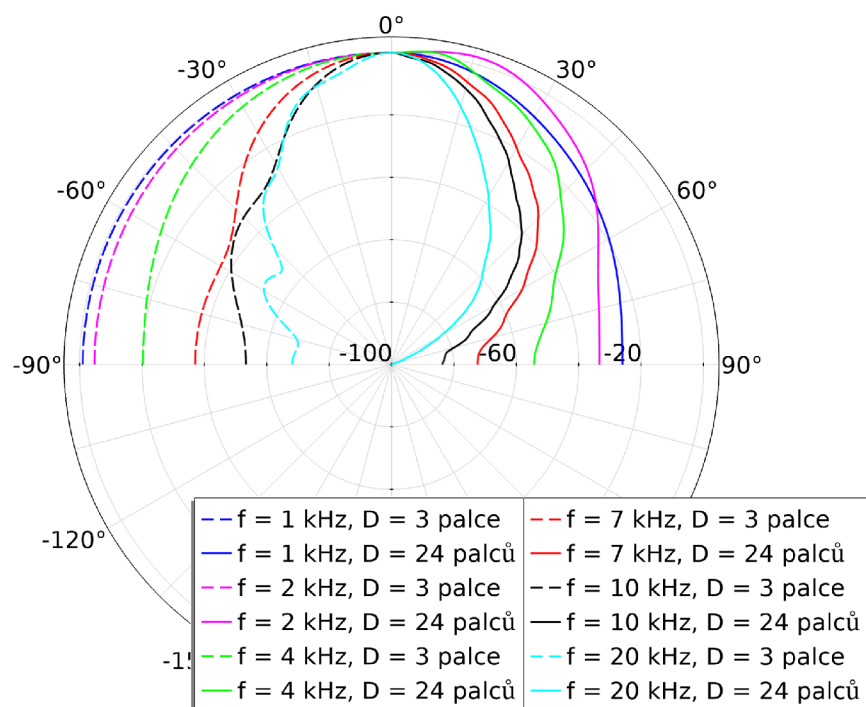
Obrázek 3.21 porovnává směrovou charakteristiku kónického zvukovodu pro dva kmitočty v závislosti na úhlu α . Na 2 kHz, kdy je vlnová délka 1,8krát menší než D (jejich velikosti jsou srovnatelné), s klesajícím úhlem roste směrovost. Na 7 kHz, kdy je vlnová délka 6,2krát menší než D , s klesajícím úhlem směrovost roste také, výjimkou je však charakteristika pro $\alpha = 25,6^\circ$, u které dochází k výraznému nárůstu hladiny akustického tlaku mezi úhly 0° až 30° .

Obrázek 3.22 poté srovnává směrové charakteristiky exponenciálního zvukovodu pro stejné rozměry D a l jako obr. 3.21. Je vidět, že na obou kmitočtech mají charakteristiky méně výrazné postranní laloky než v případě kónického zvukovodu. Navíc s klesajícím úhlem proporcionálně klesá směrovost, a to pro všechny úhly bez výjimky.

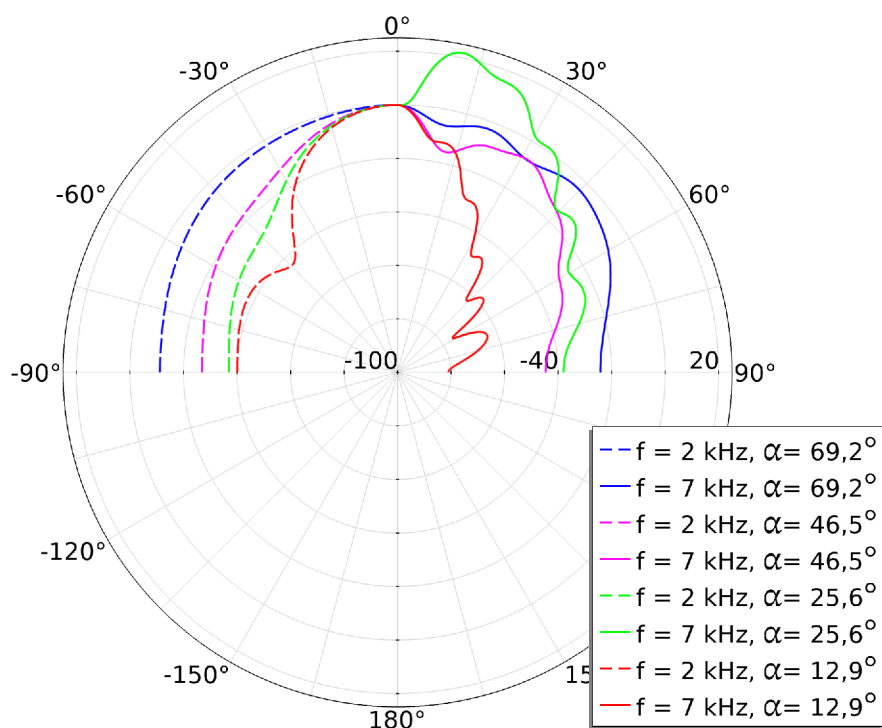
Směrové charakteristiky všech geometrií vyobrazené na obr. 3.17 se nachází v příloze B.



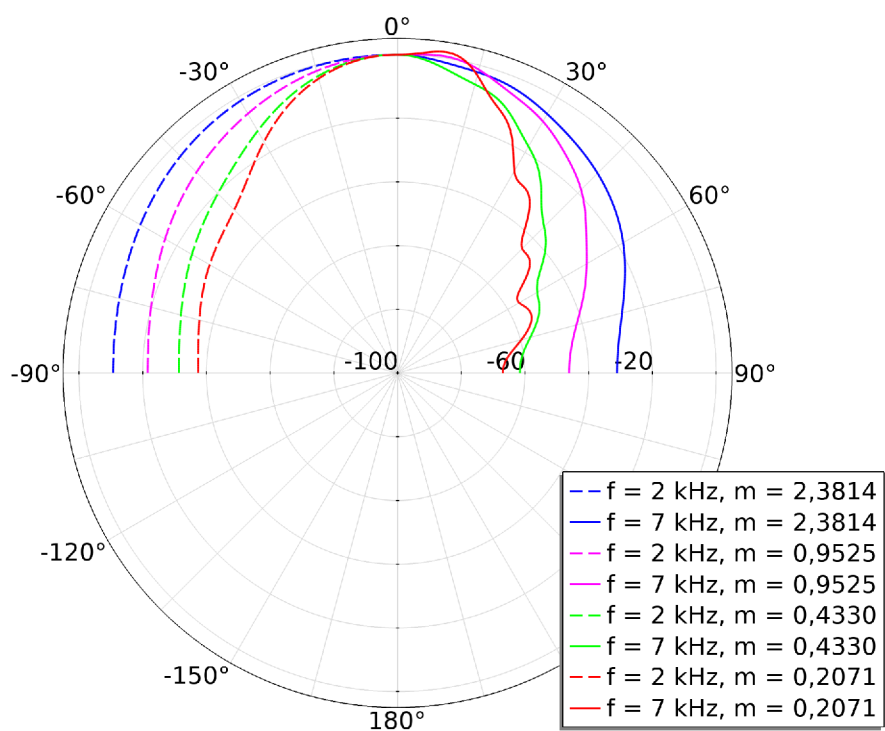
Obr. 3.19: Srovnání směrové charakteristiky kónického zvukovodu pro dvě různé velikosti průměru ústí D v závislosti na kmitočtu, $\alpha = 25,6^\circ$.



Obr. 3.20: Srovnání směrové charakteristiky exponenciálního zvukovodu pro dvě různé velikosti průměru ústí D v závislosti na kmitočtu, poměr D a l odpovídá úhlu α pro kónický zvukovod.



Obr. 3.21: Srovnání směrové charakteristiky kónického zvukovodu pro dva různé kmitočty v závislosti na úhlu α .

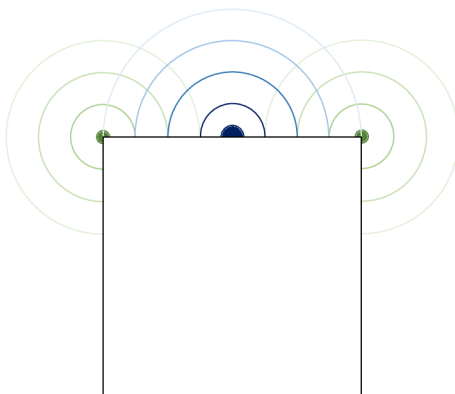


Obr. 3.22: Srovnání směrové charakteristiky exponenciálního zvukovodu pro dva různé kmitočty v závislosti na poměru D a l odpovídající úhlu α pro kónický zvukovod.

3.3 Reproduktorová ozvučnice a difrakce

Jev zvaný difrakce neboli ohyb je spojen s šířením vlny. Vysvětluje ho tzv. *Huygensův princip*, který říká: „Všechny body na vlnoploše slouží jako bodové zdroje sekundárních kulových vlnoploch. Po nějakém čase Δt bude novou polohou vlnoplochy tečná plocha k těmto sekundárním vlnoplochám“ [18]. Z této konstrukce vyplývá, že pokud vlna dorazí k překážce, je schopna se „ohnout“ (difraktovat) a šířit se i v oblasti geometrického stínu překážky.

Slovo difrakce je však v oblasti „Hi-Fi“ často skloňováno ve spojení s hranami ozvučnice reproduktorové soustavy a to v negativním smyslu. Když zvuková vlna vyzářena reproduktorem vsazeným do ozvučnice konečných rozměrů dospěje na hranu její přední desky, neohne se pouze za ní, ale také do prostoru před reproduktorem, tedy do oblasti, která nás z pohledu reprodukce zvuku zajímá. Huygensův princip toto nevyklučuje – bod na hraně ozvučnice za určitý časový okamžik jistě bude součástí nějaké vlnoplochy⁷, a tedy stane se novým zdrojem vlnění. Např. v [19] je tento jev popsán pomocí přístupu profesora Petera Svenssona, výzkumníka akustické skupiny na norské univerzitě NTNU: Hrana přední desky ozvučnice se podle Huygensova principu rozdělí na jednotlivé bodové zdroje. Každý tento zdroj poté přispívá krátkým pulsem do celkové impulsní odezvy reproduktorové soustavy. Součet těchto pulsů s impulsní odezvou reproduktoru je poté transformován pomocí inverzní Fourierovy transformace do frekvenční oblasti, kde je jev způsobený difraktovanou vlnou na hranách ozvučnice patrný.



Obr. 3.23: Vznik difraktovaných vln na hranách přední desky ozvučnice, půdorys.

Výsledkem je složení přímé vlny vyzářené reproduktorem a vlny zpožděné, která je difraktována na hranách ozvučnice. K tomuto jevu dochází na všech hranách ozvučnice, hrany na přední desce jsou ale pochopitelně z pohledu zájmu o vyrovnaný

⁷Konkrétně to bude za čas d/v_a , kde d je vzdálenost bodového zdroje od hrany ozvučnice a v_a rychlost zvuku ve vzduchu.

poslech v oblasti před reproduktorem nejvýznamnější. Tato interference zapříčiňuje méně či více znatelné zvlnění frekvenční charakteristiky v referenční ose reproduktorové soustavy či mimo ni. Toto je podloženo spoustou měření – známou publikací, ve které jsou zobrazeny frekvenční charakteristiky měřených reprosoustav s důrazem na zachycení vlivu difrakcí, je např. [17] Harryho F. Olsona, už z roku 1957. Já sám jsem měl možnost pozorovat vliv difrakcí na frekvenční charakteristiku u různých tvarů ozvučnic při jejich měření v bezodrazové komoře na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v rámci předmětu Reproduktorové soustavy.

Cílem této simulace je demonstrovat vliv difrakcí na frekvenční charakteristiku reproduktoru vsazeného do různých tvarů ozvučnic. Pro simulaci jsem vybral tyto tvary: krychli, kvádr, kouli a geometrii kapkovitého tvaru. U prvně zmíněných dvou by difraktované vlny měly mít na frekvenční charakteristiku větší vliv z důvodu přítomnosti hran. Jako akustický zdroj jsem zvolil zdroj bodový.

U tvaru krychle jsem simuloval chování reproduktorové soustavy pro souměrně i nesouměrně umístěný zdroj s poloměrem zaoblení předních hran 0,5 mm. Pro souměrně umístěný zdroj jsem ještě navíc simulaci provedl pro poloměr zaoblení 10 a 30 mm. Podobně, u tvaru kvádru jsem simuloval souměrně i nesouměrně umístěný zdroj s poloměrem zaoblení předních hran 0,5 mm. Protože je však kvádrová ozvučnice jednoznačně v praxi nejpoužívanější geometrií, vsadil jsem do ni také dva ideální reproduktory – kruhové píсты – s průměry 1 a 6 palců. Na tyto jsem poté aplikoval frekvenční výhybku, abych simuloval idealizovanou verzi dvoupásmové regálové reprosoustavy. Stejně jako u krychlové ozvučnice jsem výpočet provedl třikrát, pro tři verze zaoblení předních hran.

3.3.1 Postup

Definice části globálních parametrů je uvedena v tab. 3.4.

U geometrie kvádru a krychle jsem použil 3D komponent, u koule a kapkovitého tvaru osově symetrický 2D komponent. Výpočetní doménou bude těleso, které vznikne odebráním dané ozvučnice od koule, která ji bude obklopovat. Všechny použité tvary jsou primitivní, a proto popíšu konkrétní **postup tvorby geometrie** pouze té nejsložitější, kterou je ozvučnice tvaru kapky:

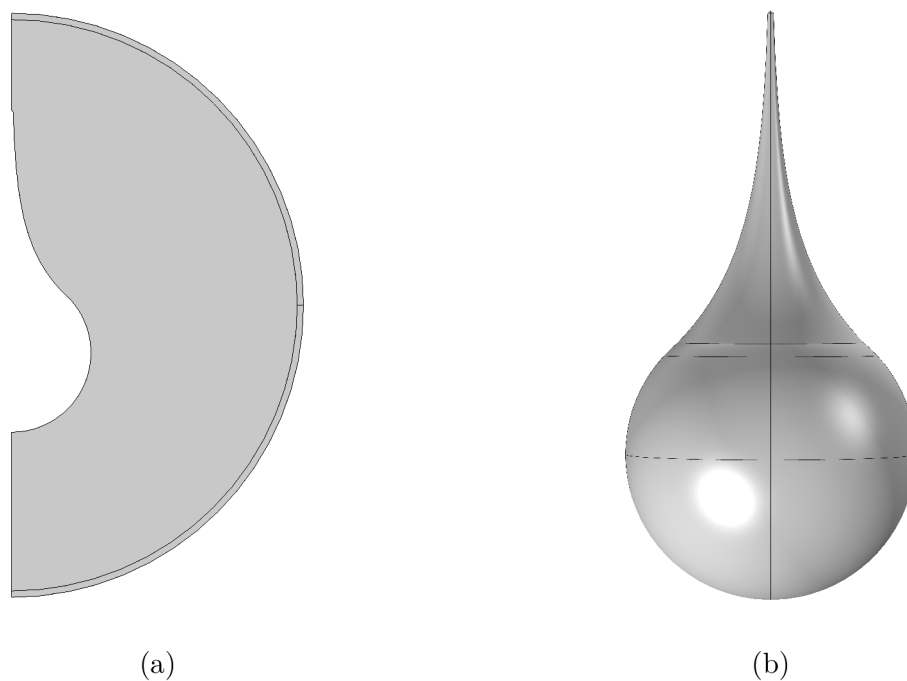
- vytvoření kružnice s poloměrem $r_w/2$ pomocí příkazu *Circle* (typ objektu: *Curve*),
- vytvoření parametrické křivky v ose r dle rovnice 3.9 pomocí příkazu *Parametric Curve* experimentálně posunutou v ose z o $2r_w + 4$ mm tak, aby křivka vytvořenou kružnicí protínala, ale zároveň na ni co nejpřesněji navazovala,
- rozdělení kružnice vytvořenou parametrickou křivkou pomocí příkazu *Partition Objects*,

Tab. 3.4: Výčet části globálních parametrů, model ozvučnic.

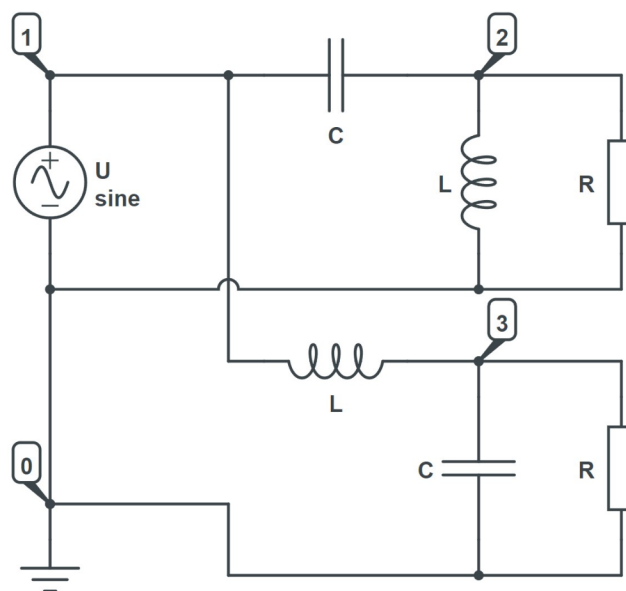
Název	Hodnota	Popis
r_w	25 cm	šířka kvádru/hrana krychle/průměr koule
r_h	40 cm	výška kvádru
r_d	31 cm	hloubka kvádru
f_r	0,5 mm	poloměr zaoblení předních hran
PML_t	10 mm	tloušťka vrstvy PML
s_r	$r_w + PML_t + 20$ cm	poloměr kruhu/koule ohraničující výpočetní doménu
t_r	0,5 palce	poloměr výškového reproduktoru
w_r	3 palce	poloměr středobasového reproduktoru
f_d	3 kHz	dělicí frekvence
v_a	343 m/s	rychlost zvuku ve vzduchu
TW_1	$(5/4)v_a/f_d$	vzdálenost mezi ref. body výšk. a středobas. reproduktoru
R	8Ω	jmenovitá impedance reproduktorů
C	$1/(4\pi f_d R_z)$	kapacita kapacitoru
L	$R_z/(\pi f_d)$	indukčnost induktoru

- rozdělení parametrické křivky pomocí vytvořené kružnice,
- odebrání dílčích nepotřebných křivek pomocí příkazu *Delete Entities*,
- vytvoření čtvrtkružnice (*Sector angle: 90°*) s poloměrem 2,5 mm experimentálně posunutou v ose z o 504 mm tak, aby na křivku navazovala,
- vytvoření půlkruhu o poloměru s_r s jednou vnitřní vrstvou o tloušťce PML_t , který je posunut v ose z o 200 mm tak, aby obklopoval dříve vytvořenou křivku,
- rozdělení půlkruhu pomocí vytvořené křivky,
- odebrání vnitřní části rozděleného půlkruhu.

Definovaným materiálem ve výpočetní doméně je vzduch. Co se týče **fyzikálních rozhraní**, v této simulaci jsou definovány dvě. Prvním z nich, které je relevantní pouze pro komponent dvoupásmové reproduktorové soustavy, je rozhraní *Electrical Circuit*, ve kterém jsem vytvořil pasivní frekvenční výhybku druhého řádu typu Linkwitz-Riley. Ta se skládá z kapacitorů, induktorů a rezistorů, jejichž hodnoty jsou definovány v tab. 3.4. Schéma zapojení je vyobrazeno na obr. 3.25. Čísledné označení uzlů přímo odpovídá jejich přiřazení k jednotlivým součástkám v rozhraní. Napětí v uzlu 2 je filtrováno horní propustí – bude budit výškový reproduktor. Naproti tomu napětí v uzlu 3 je filtrováno dolní propustí, a tedy bude budit reproduktor středobasový.



Obr. 3.24: Finální geometrie kapkovitého tvaru (a) a její zobrazení v prostoru(b).



Obr. 3.25: Schéma zapojení pasivní výhybky Linkwitz-Riley druhého řádu včetně popisu uzlů.

Druhým fyzikálním rozhraním je *Pressure Acoustics, Frequency Domain* s nastavením okrajové podmínky *Sound Hard Boundary, Wall* na okrajích výpočetní domény, tedy i včetně povrchu jednotlivých ozvučnic. Pro buzení jsem zvolil okrajovou podmínku *Monopole Point Source* zajišťující ideální všesměrový bodový zdroj s konstantním výkonem. Jako efektivní hodnotu vyzářeného výkonu jsem nastavil 1 W. Jedinou výjimkou je komponent dvoupásmové reproduktorové soustavy, jejíž měniče budí okrajová podmínka vektoru akustického zrychlení. Velikost tohoto vektoru jsem získal následovně: Z vypočtených diskrétních hodnot napětí pro jednotlivé měniče jsem vytvořil spojitý průběh pomocí funkce *Interpolation*, která diskrétní hodnoty lineárně interpoluje. To, že se jedná o průběh napětí je nepodstatné – ve skutečnosti nám jde pouze o průběh této funkce. Aby oba měniče na dělicí frekvenci f_d vyzářili stejný akustický výkon, musí kmitat se stejným akustickým objemovým zrychlením, pro které platí

$$Q = \mathbf{a}_a \cdot S, \quad (3.10)$$

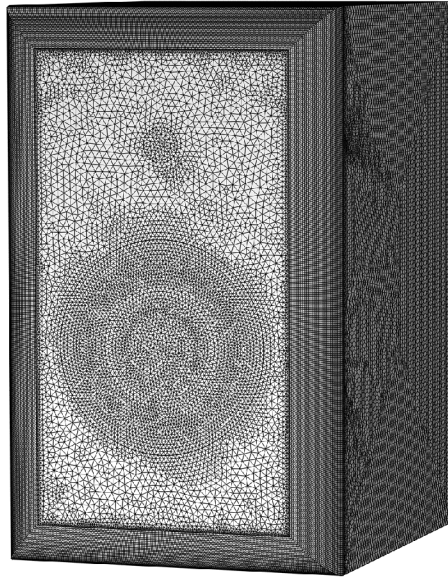
kde \mathbf{a}_a vyjadřuje vektor akustického zrychlení a S plochu, které je tento vektor předsán. Pokud by plochy kmitaly se stejným zrychlením, větší měnič by vyzářil větší akustický výkon. Proto bude velikost vektoru akustického zrychlení odpovídat průběhu napětí, které bude vyděleno plochou měniče⁸. Dále jsem znovu využil funkce *Exterior Field Calculation* pro výpočet zvukového pole mimo výpočetní oblast, která je nastavena na vnitřní vrstvu půlkruhu/koule, tentokrát s nastavením bez podmínky symetrie.

Daším bodem je **nastavení sítě**. Zde pro ukázkou popíšu síť týkající se geometrie dvoupásmové reprosoustavy. Nejprve jsem definoval globální uzel *Size*, který ovlivňuje velikost elementů u všech dílčích typů sítě, u kterých nevytvořím lokální uzel *Size*. Zde jsem nastavil maximální rozměr elementu h_{\max} následovně:

$$h_{\max} = \begin{cases} \frac{343 \text{ m/s}}{2000 \text{ Hz} \cdot 6}, & \text{pokud } f < 2000 \text{ Hz} \\ \frac{343 \text{ m/s}}{f \cdot 6}, & \text{v ostatních případech.} \end{cases}$$

Do frekvence 2000 Hz bude h_{\max} odpovídat 1/6 vlnové délky odpovídající frekvenci 2000 Hz, na vyšších frekvencích už se bude snižovat poměrně k rostoucí frekvenci. Důvody pro zjemnění sítě na nízkých kmitočtech jsou dva. Na plochách ozvučnice bude použita velmi jemná síť, a takto nedojde k náhlým velkým změnám velikosti elementů mezi těmito plochami a okolím, které jsou nežádoucí. Dále, protože tento uzel bude ovlivňovat i velikost elementů na vnější kouli, velikosti odpovídající $\lambda/6$ na nízkých kmitočtech (v desítkách až stovkách cm) způsobují „borcení“ tvaru této koule a výpočet by poté byl zkreslený.

⁸Funkčnost jsem otestoval vsazením takto buzených měničů do nekonečné ozvučnice. Výsledkem opravdu byla rovná frekvenční charakteristika v celém frekvenčním spektru.



Obr. 3.26: Ukázka trojúhelníkové sítě na stěnách ozvučnice, $f_r = 30$ mm.

Následně jsem vytvořil strukturovanou síť *Mapped* na předních zaoblených hranách ozvučnice. Pomocí příkazu *Distribution* jsem nastavil počet elementů d podél hrany pomocí následující podmínky:

$$d = \begin{cases} 5, & \text{pokud } f < 1 \text{ mm} \\ f_r, & \text{v ostatních případech.} \end{cases}$$

Tak jsem dosáhl 5, 10 a 30 elementů pro poloměr zaoblení 0,5, 10 a 30 mm. Dále jsem nastavil trojúhelníkovou síť *Triangular* na plochách ozvučnice s nastavením maximální velikosti elementu na $343 \text{ (m/s)} / (1000 \text{ Hz}) / 6$. Vyjimku tvoří budící plocha, u které jsem tuto velikost ještě zmenšil na polovinu. Nakonec jsem použil síť *Swept* pro vrstvu koule, ke které je přiřazena vrstva PML, síť *Tetrahedral* složenou ze čtyřstěnnů, a také jsem vytvořil jednu tenkou vrstvu před PML vrstvou pro přesnější výpočet *Exterior Field Calculation* stejně jako v 3.1.

Jako **typ studie** jsem zvolil *Frequency Domain*, která je vhodná pro obě použité fyzikální rozhraní, jelikož nás bude zajímat odezva modelu na harmonický signál. Nejdříve bylo třeba vypočítat elektrický obvod v jedné studii, abych jeho výsledky mohl použít pro buzení reproduktorů v rozraní *Pressure Acoustics, Frequency Domain* vypočtené v další studii. Využil jsem funkce *Parametric Sweep* s přiřazeným parametrem f , kterému jsem nastavil rozsah 20 až 8500 Hz s krokem 1/6 oktávy do 500 Hz a s krokem 1/12 oktávy dále. Pro geometrie s měnícím se poloměrem zaoblení jsem přiřadil ještě parametr f_r s hodnotami 0,5, 10 a 30 mm⁹.

⁹Z neznámých důvodů program při změně parametru f_r mazal výběr hran zaoblení pro příkaz *Distribution* v nastavení sítě. Toto vyřešila funkce výběrové množiny typu *Box* (lokální uzel *Defi-*

3.3.2 Výsledky

Před rozebráním výsledků bych chtěl zmínit, že takovýto typ simulace představuje velkou výpočetní náročnost. Velký počet elementů ve výpočetní oblasti znamenal vysoký počet stupňů volnosti, který na nejvyšších analyzovaných frekvencích atakoval hranici 20 milionů. Následně popsané simulace zabraly nadstandardně výkonnému stolnímu počítači několik desítek hodin a výsledky odpovídaly stovkám GB dat.

Grafy jednotlivých frekvenčních charakteristik se nachází na obrázcích 3.27 až 3.31. Vždy je vykreslena hladina akustického tlaku v 1 m od referenční osy reprosoustavy, která je vztažena k hladině akustického tlaku, kterou vyzářil bodový zdroj (či dvojice měničů) v nekonečné rovinné ozvučnici¹⁰.

Obr. 3.27 zobrazuje frekvenční charakteristiku reproduktorové soustavy s ozvučnicí tvaru kapky a koule. Zvyšující se hladina akustického tlaku o více než 5,5 dB u obou průběhů je jev, který se projevuje u ozvučnic konečných rozměrů: Bodový zdroj umístěn do nekonečné rovinné ozvučnice vyzařuje akustickou energii do poloprostoru. Pokud by do této ozvučnice vsazen nebyl, vyzařoval by do celého prostoru, tedy stejná akustická energie by se rozložila do dvojnásobného objemu. To odpovídá poklesu akustického tlaku o 6 dB. Tento jev se někdy označuje anglickým výrazem *baffle-step*. Stejným způsobem je možné objasnit pokles i u ozvučnice reálných rozměrů, kde pro nízké frekvence s vlnovými délkami srovnatelnými či násobně většími¹¹ než jsou rozměry ozvučnice nepředstavuje téměř žádnou překážku – reproduktor vyzařuje do celého prostoru. Naopak pro vysoké frekvence s vlnovými délkami násobně menšími ve srovnání s ozvučnicí se při zanedbání vlivu difrakcí ozvučnice chová téměř jako nekonečná a reproduktor vyzařuje do poloprostoru. Z charakteristik je vidět, že rozdíl mezi výše popsaným ideálním případem a případem reálným pro ozvučnici tvaru kapky je menší než 0,5 dB.

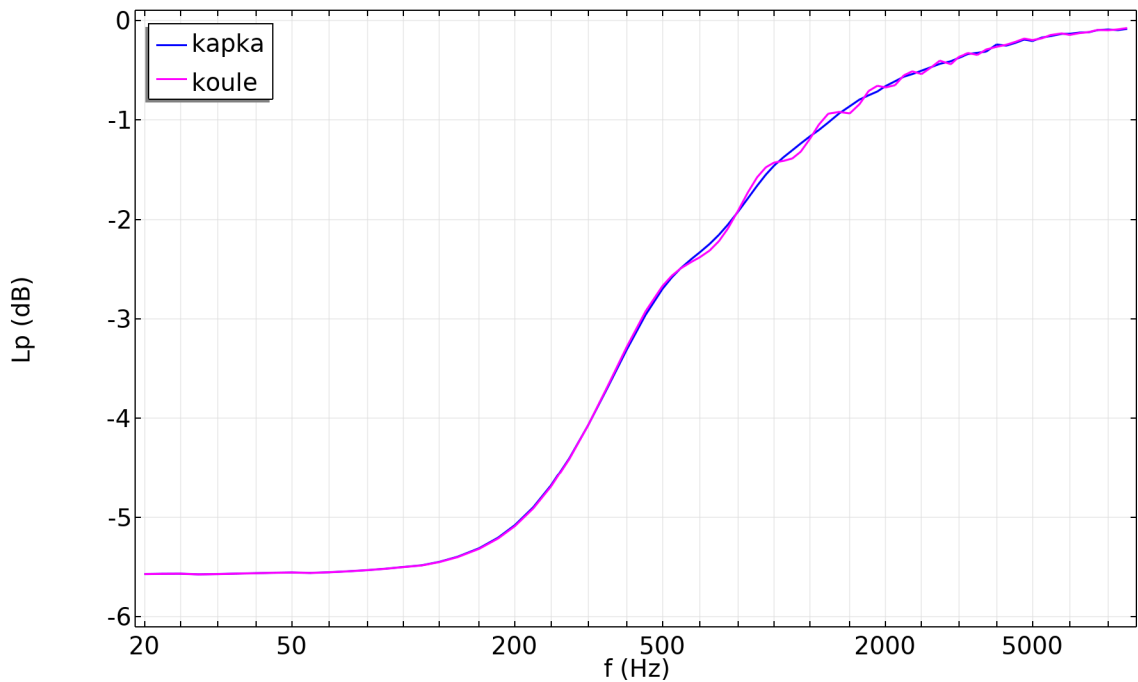
Frekvenční charakteristika reproduktorové soustavy s ozvučnicí tvaru kapky má ze všech simulovaných nejvyrovnanější průběh. Je vidět, že nedochází k žádným difrakcím do pozorovaného místa, které by průběh ovlivňovaly. Průběh charakteristiky s kulovou ozvučnicí je difrakcemi ovlivněn jen nepatrně, maximální míra zvlnění proti kapkovitému tvaru je do 0,1 dB, což je rozdíl lidským uchem nepostřehnutelný.

Obr. 3.28 zachycuje frekvenční charakteristiky reproduktoru v krychlové ozvučnici společně s „referenční“ charakteristikou ozvučnice tvaru kapky. Vzdálenosti zdroje od hran ozvučnice jsou pro symetricky umístěný zdroj 12,5 cm, pro nesymetricky umístěný zdroj 6,25 a 18,75 cm. Pro všechny krychlové ozvučnice je patrný

nititions komponentu), která umožňuje výběr geometrických entit protínající uživatelem nastavený kvádr.

¹⁰Tyto jsem simuloval také, abych k nim prezentované výsledky mohl vztáhnout.

¹¹Toto výrazně ovlivňuje tvar ozvučnice – viz rozdíly mezi příloženými frekvenčními charakteristikami.

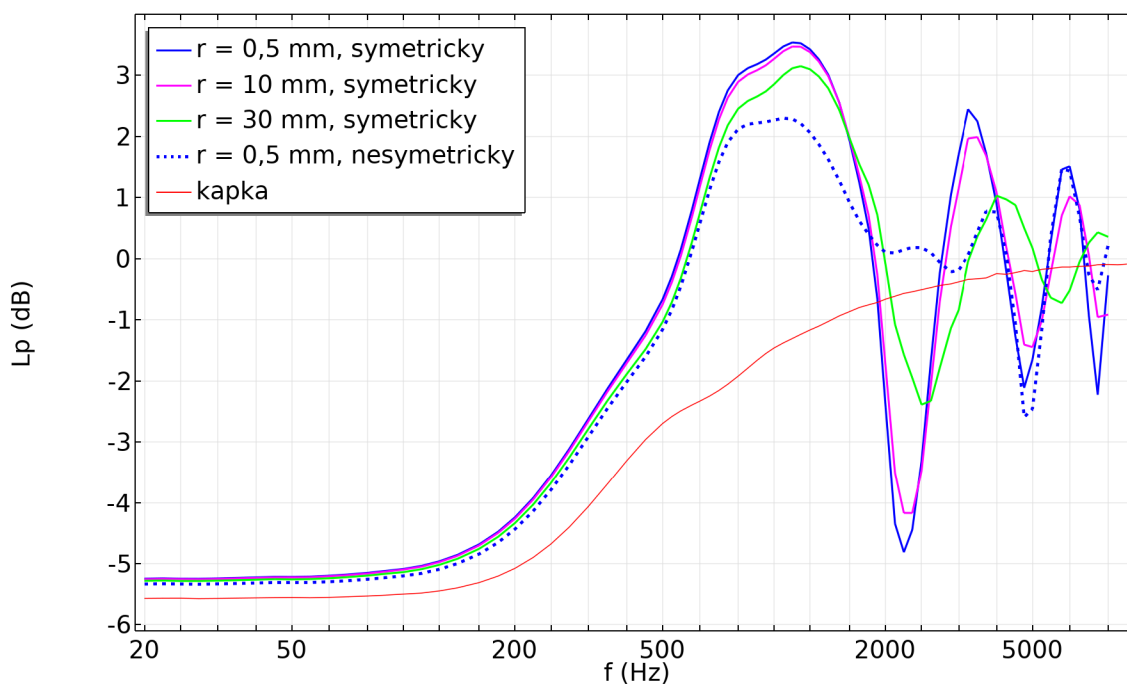


Obr. 3.27: Srovnání frekvenční charakteristiky bodového zdroje v ozvučnici tvaru koule a kapky.

baffle-step do přibližně 700 Hz. V případě symetrického umístění zdroje poté dochází ke střídání výrazných maxim a minim, jejichž intenzita s rostoucím kmitočtem v průměru klesá. Pro poloměr zaoblení hran 0,5 mm se jednotlivá maxima nachází přibližně na těchto frekvencích: 1130, 3350 a 6200 Hz, minima poté na 2250, 4750 a 7500 Hz. Nejvýraznější odchylkou je první minimum s propadem přibližně o 4,7 dB vůči rovinné ozvučnici. Frekvence, na kterých dochází k propadům a zdvihům se nedají jednoduše spočítat. Pokud by se např. difraktovaná vlna šířila nejkratší cestou, tj. ze zdroje na hranu ozvučnice a následně přímo k pozorovanému místu, dráhový rozdíl by činil 13,3 cm, což odpovídá frekvenci 2560 Hz¹², frekvenci o více než 300 Hz vyšší než je frekvence prvního minima.

Pokud poloměr zaoblení hran bude 20krát větší, tj. 10 mm, rozdíl ve frekvenční charakteristice bude nepatrný, a to jen v oblastech propadů a zdvihů. S rostoucím kmitočtem však bude narůstat – od 0,1 dB (700 Hz) po více než 1 dB (7500 Hz). Další ztronásobení tohoto zaoblení na 30 mm už frekvenční charakteristiku ovlivní výrazněji – rozdíl intenzity maxim a minim je od 0,6 dB do 1,6 dB, zároveň dochází k jejich posunu na vyšší kmitočty. Nesymetrické umístění zdroje, kde je jeho vzdálenost od jedné dvojice hran různá, má vliv primárně na intenzitu konkrétních zdvihů a propadů. Např. první maximum je v porovnání se symetricky umístěným zdrojem o 0,8 dB méně výrazné, k minimumu na 2250 Hz vůbec nedochází. Naopak minimum

¹²Pro rychlost zvuku 343 m/s, která je v simulaci použita.

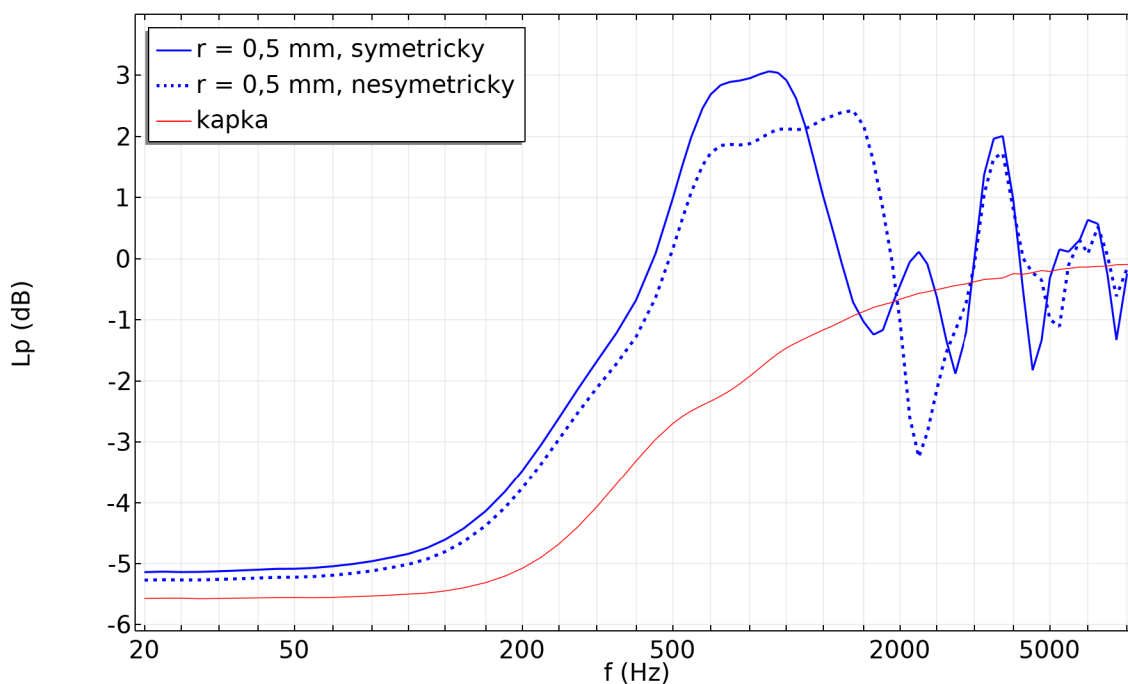


Obr. 3.28: Srovnání frekvenční charakteristiky bodového zdroje v krychlové ozvučnici.

na frekvenci 4750 Hz je dokonce o 0,5 dB výraznější.

Na obr. 3.29 je zachycena směrová charakteristika stejného zdroje v kvádřové ozvučnici pro jeho symetrické i nesymetrické umístění společně s „referenční“ charakteristikou ozvučnice tvaru kapky. Vzdálenosti zdroje od hran ozvučnice jsou pro symetricky umístěný zdroj 12,5 a 20 cm, pro nesymetricky umístěný zdroj 12,5, 9,7 a 30,3 cm. Nesymetrické umístění je shodné s umístěním výškového reproduktoru u dvoupásmové reprosoustavy. Na charakteristice pro symetrický zdroj je do 450 Hz pozorovatelný *baffle-step*, poté následuje střídání maxim a minim. Maxima se nachází na frekvencích 900, 2250, 3700 a 6300 Hz, minima na 1700, 2800, 4500 a 7500 Hz. Průběh z velké části odpovídá průběhu pro krychlovou ozvučnici, intenzita maxim a minim je však v průměru o 0,6 dB snížena. K největšímu rozdílu dochází na frekvenci 2250 Hz, kde výrazné minimum patrné u krychlové ozvučnice u charakteristiky ozvučnice kvádřové vůbec není. Naopak na této frekvenci dochází ke srovnání hladiny akustického tlaku k 0 dB.

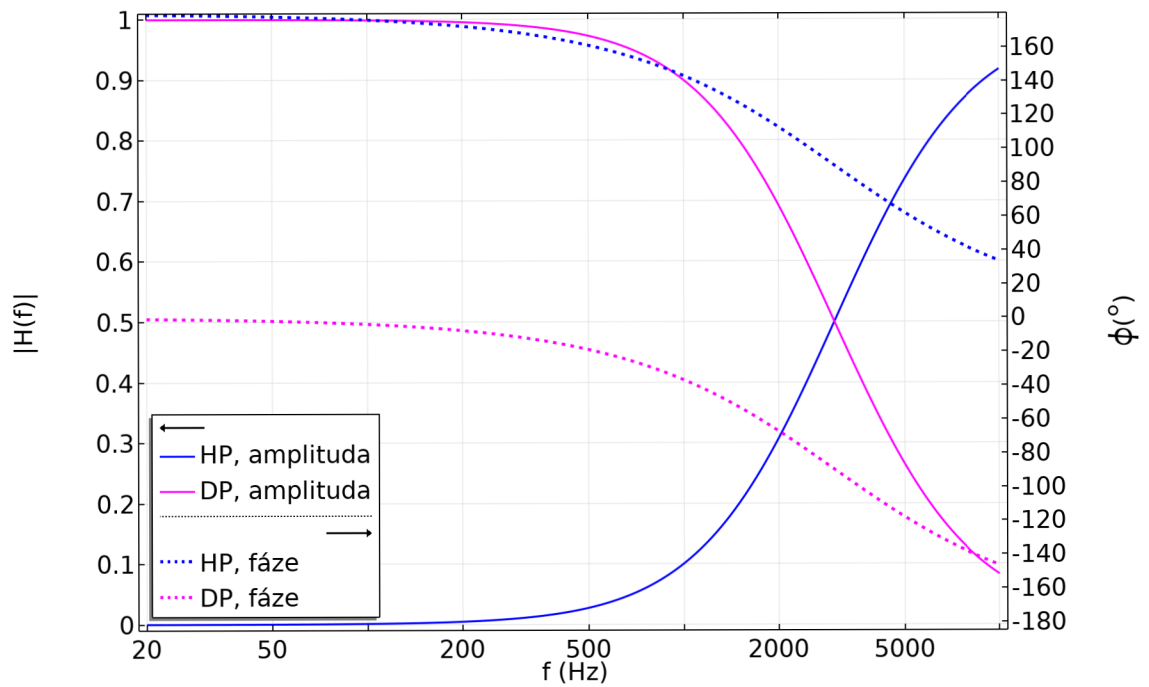
Charakteristiky pro nesymetricky umístěný zdroj se výrazněji liší v podstatě pouze do kmitočtu 2500 Hz. *Baffle-step* je patrný do 500 Hz, první zdvih má více než dvojnásobnou šířku pásma a současně o 0,7 dB nižší intenzitu. K propadu na frekvenci 2250 Hz zde, podobně jako u symetricky umístěného zdroje v krychlové ozvučnici, dochází. Dle mého názoru je to způsobeno podobnou vzdáleností zdroje zvuku od tří hran (narozdíl od dvou u symetricky umístěného zdroje).



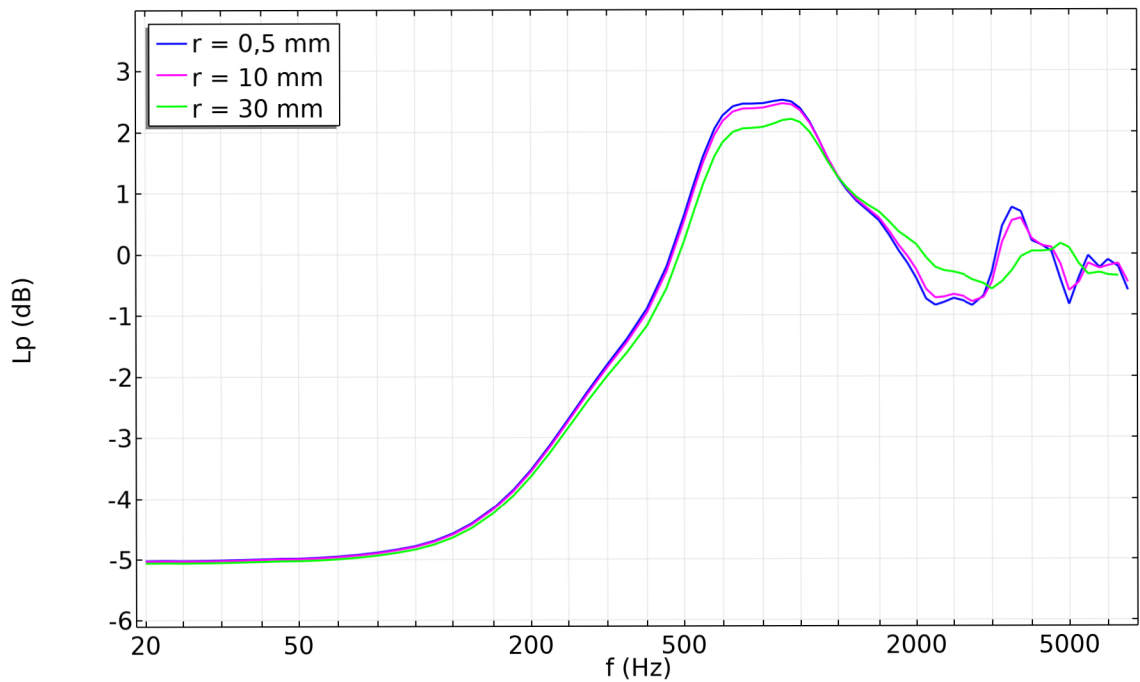
Obr. 3.29: Srovnání frekvenční charakteristiky bodového zdroje v kvádrové ozvučnici.

Výsledky průběhu napětí modelované v rozhraní *Electrical Circuit* jsou vykresleny na obr. 3.30. Vzhledem k tomu, že průběh fáze je vyjma fázového posuvu o 180° pro oba filtry shodný, pro buzení zdrojů jsem využil pouze vyobrazenou amplitudovou charakteristiku, která má v součtu přenos na dělicí frekvenci f_d roven 1.

Poslední srovnání frekvenčních charakteristik této simulace sdružuje obrázek 3.31. Tyto se týkají dvoupásmové reproduktorové soustavy, která má stejné rozměry jako již zmíněná kvádrová ozvučnice. Jednotlivé charakteristiky odpovídají různým hodnotám poloměru zaoblení předních hran (0,5, 10 a 30 mm). Pro $f_r = 0,5$ mm se nabízí srovnání s charakteristikou nesymetricky umístěného zdroje ve stejné kvádrové ozvučnici. První maximum v rozmezí 700 až 1000 Hz má v tomto srovnání méně než poloviční šířku pásma, průměrná hladina akustického tlaku tohoto maxima je však shodná pro oba průběhy s hodnotou 2,5 dB. V oblasti 2200 až 2800 Hz průběh spíše připomíná charakteristiku symetricky umístěného zdroje, v charakteristice se nachází lokální minimum s hodnotou $-0,7$ dB. To pravděpodobně souvisí s faktem, že v blízkosti těchto frekvencí vyzařují oba měniče stejný akustický výkon – výsledné hodnoty akustického tlaku nejsou složeny z příspěvků jednoho ale dvou nesymetricky umístěných zdrojů. Na frekvenci 3350 Hz je přítomno maximum s hodnotou 0,7 dB – na podobné frekvenci a s nižší intenzitou než v případě nesymetricky umístěného zdroje. Poté je na frekvenci 5000 Hz přítomno minimum s hodnotou $-0,7$ dB, zase na obdobné frekvenci, ale s nižší intenzitou než v případě nesymetricky umístěného



Obr. 3.30: Amplitudová a fázová charakteristika pasivní výhybky Linkwitz-Riley druhého řádu.



Obr. 3.31: Srovnání frekvenční charakteristiky dvoupásmové regálové reproduktorové soustavy.

zdroje.

Pokud se poloměr zaoblení 20krát zvýší ($f_r = 10$ mm), na charakteristiku to prakticky nemá žádný vliv. V oblastech maxim a minim dochází ke snížení jejich intenzity v rozmezí 0,1 dB (1000 Hz) až 0,3 dB (5000 Hz). Další trojnásobné zvýšení poloměru zaoblení ($f_r = 30$ mm) stejně jako u krychlové ozvučnice má význam mnohem větší. Intenzita lokálních maxim a minim klesne v průměru o 0,5 dB, a ty se s rostoucím kmitočtem posouvají výše.

Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření jednoduchých simulací v oblasti elektroakustiky s pomocí prostředí *COMSOL Multiphysics*[®], jejichž výsledky budou sloužit k výukovým účelům. Protože pro mě byla tvorba těchto simulací úplně nová zkušenost, prostor jsem věnoval nejen popisu programu *COMSOL Multiphysics* a konkrétním simulacím, ale také teorii výpočtů, které simulace využívá – diferenciální rovnicím a metodě konečných prvků. Tento text tedy může sloužit nejen jako zdroj výsledků z vytvořených simulací, ale také jako jakýsi úvod do „světa simulací“ s využitím prostředí *COMSOL Multiphysics*, především se zaměřením na oblast elektroakustiky.

Co se týče tvorby konkrétních simulací, celkem byly vytvořeny tři. Zabývají se vlivem tvarů membrán a zvukovodů na vyzařování reproduktoru a tvary ozvučnic, u kterých je zkoumán vliv difraktovaných vln na frekvenční charakteristiku.

V první simulaci bylo srovnáno blízké zvukové pole membrány pro tvar kruhového pístu, parabolický a hyperbolického tvar kruhového průřezu, rozvinutelný tvar kruhového a eliptického průřezu a kopule pro různé hodnoty parametru kR . Pro stejné geometrie i hodnoty kR byly získány i směrové charakteristiky pro vzdálené pole. Navíc jsou přiloženy i frekvenční charakteristiky ve vzdálenosti 1 m, které demonstrují vliv proměnného fázového rozdílu vlnění od příspěvků jednotlivých elementů membrány na průběh této charakteristiky na vysokých kmitočtech. Ukázalo se například, že kopulovitý tvar membrány je ze všech simulovaných tvarů nejméně směrový, nebo že natočení eliptické membrány má výraznější vliv na směrovou charakteristiku pouze v případě, že $kR > 5$.

Druhá simulace se zabývala vlivem tvaru zvukovodu na vyzařování reproduktoru. Konkrétně došlo ke srovnání směrových charakteristik ve vzdálenosti 1 m pro kónický a exponenciální tvar zvukovodu, pro různé poměry délky a průměru ústí zvukovodu. Ze simulací vyšlo, že exponenciální tvar zvukovodu je obecně mnohem vhodnější než tvar kónický. Směrnost exponenciálního zvukovodu se totiž s rostoucí frekvencí proporcionálně zvyšovala bez větší míry přítomnosti minim a maxim, narozdíl od zvukovodu kónického.

Třetí simulace zkoumala vliv difrakcí, ke kterým dochází na hranách ozvučnice reproduktorové soustavy. Byly simulovány ozvučnice tvaru krychle, kvádrů, koule a kapky, do kterých byl umístěn všesměrový bodový zdroj a došlo k porovnání frekvenčních charakteristik ve vzdálenosti 1 m. Dále byla simulována i idealizovaná dvoupásmová regálová reproduktorová soustava, která obsahovala pasivní výhybku 2. řádu typu Linkwitz-Riley. Bylo demonstrováno, že nejideálnější geometrií pro ozvučnici z pohledu vzniku difrakcí je tvar kapky, u kterého k tomuto jevu vůbec nedochází. Také se ukázalo, že nesymetrické umístění zdroje v krychlové ozvučnici

má na redukci difraktovaných vln ovlivňující frekvenční charakteristiku v ose větší vliv než zaoblení předních hran (při poloměru zaoblení 30 mm).

COMSOL Multiphysics je velmi komplexní nástroj, který s využitím akustického modulu nabízí mnoho možností pro tvorbu nejrůznějších modelů v jednotlivých oblastech akustiky. Já jsem při tvorbě simulací, které jsou v práci popsány, využil pouze jejich malou část. Myslím si, že by bylo velmi užitečné, aby do budoucna vznikaly další podobné simulace, které by studentům či jiným zájemcům o danou problematiku mohly pomoci přiblížit někdy těžko uchopitelné fyzikální jevy a principy.

Literatura

- [1] BUCHANAN, George. *Schaum's outline of theory and problems of finite element analysis*. New York: McGraw-Hill, 1995. Schaum's outlines series. ISBN 00-700-8714-8.
- [2] LI, Zhilin, Zhonghua QIAO a Tao TANG. *Numerical Solution of Differential Equations: Introduction to Finite Difference and Finite Elements Methods*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2018. ISBN 978-1-316-61510-2.
- [3] LOGAN, Daryl L. *A First Course in the Finite Element Method* [online]. Enhanced 6th ed. Boston (Massachusetts): Cengage, 2021 [cit. 2022-10-21]. ISBN 978-0-357-67643-1. Dostupné z: <https://www.cengage.uk>
- [4] SESHU, P. *Textbook of Finite Element Analysis*. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2003. ISBN 978-81-203-2315-5.
- [5] *The Finite Element Method (FEM)*. COMSOL [online]. 2017 [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method?parent=physics-pdes-numerical-042-62>
- [6] *Introduction to the Heat Transfer Module*. COMSOL Multiphysics® v. 5.6: COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2020.
- [7] *Introduction to the AC/DC Module*. COMSOL Multiphysics® v. 5.6: COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2020.
- [8] *LiveLink™ for MATLAB®*: Combine COMSOL Multiphysics® Simulations with MATLAB® Programming. Comsol [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/livelink-for-matlab>
- [9] *Optimization Module: Optimize Multiphysics Models*. Comsol [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/optimization-module>
- [10] *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. COMSOL Multiphysics® v. 5.6: COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2020.
- [11] *Acoustics Module User's Guide*. COMSOL Multiphysics® v. 5.6: COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2020.
- [12] *Introduction to the Acoustics Module*. COMSOL Multiphysics® v. 5.6: COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2020.
- [13] *AC/DC Module User's Guide*. COMSOL Multiphysics® v. 5.6: COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2020.

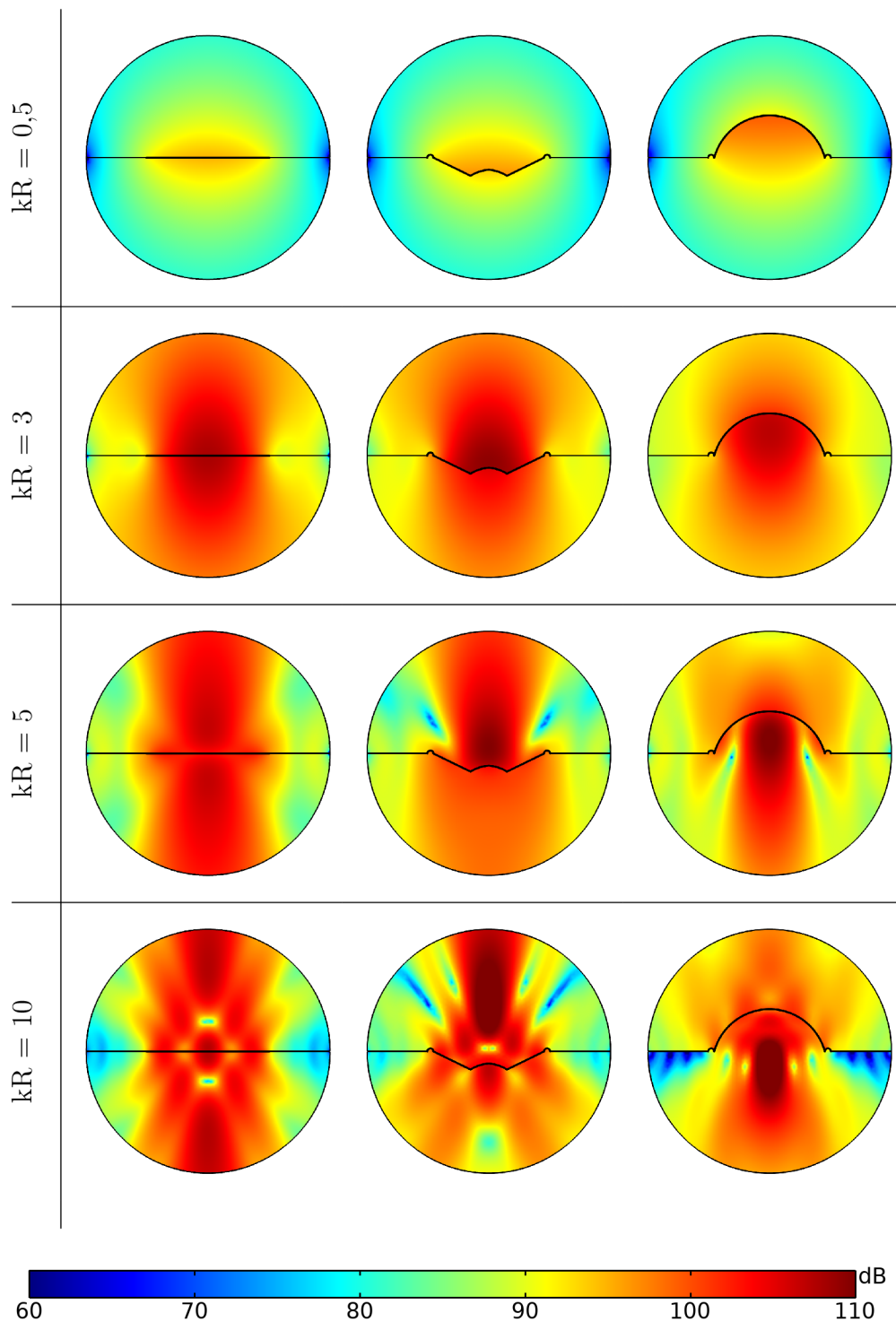
- [14] LEACH, W. Marshall, Jr. *Introduction To Electroacoustics and Audio Amplifier Design*. 4th. Dubuque, Iowa: Kendall Hunt, 2010. ISBN 978-0-7575-7286-9.
- [15] BERANEK, Leo a Tim MELLOW. *Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration*. 2nd. London: Elsevier, 2019. ISBN 9780128152270.
- [16] MERHAUT, Josef. *Teoretické základy elektroakustiky*. 4. vyd. Praha: Academia, 1985.
- [17] OLSON, Harry F. *Elements of Acoustical Engineering*. 2nd. New York: D. Van Nostrand Company, 1957.
- [18] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [19] KLEINER, Mendel. *Electroacoustics* [online]. Boca Raton (Florida): CRC Press, 2013 [cit. 2023-05-07]. ISBN 978-1-4665-9943-7.

Seznam zkratek

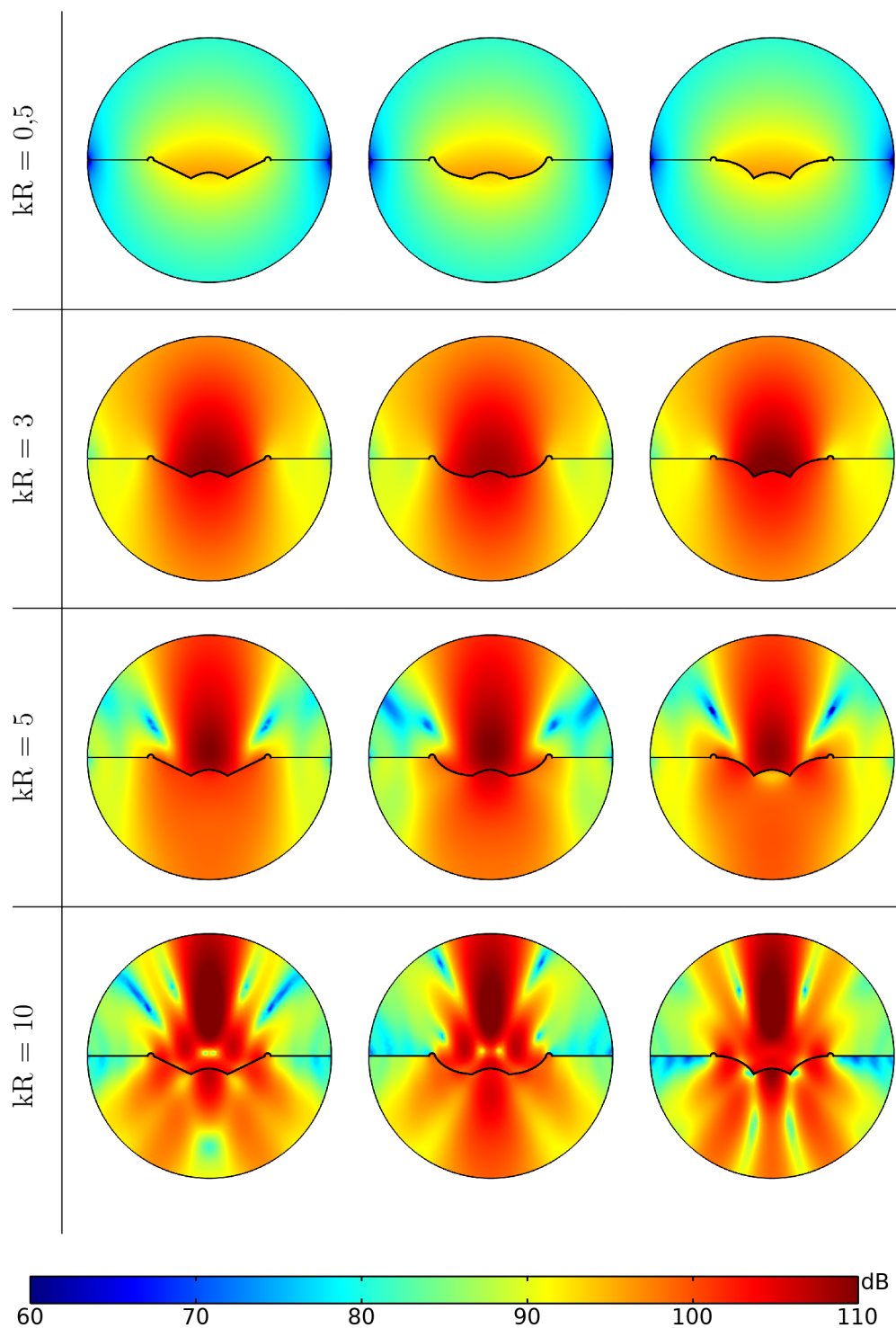
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CAD	computer-aided design (počítačem podporované projektování)
MHP	metoda hraničních prvků
MKD	metoda konečných diferencí
MKO	metoda konečných objemů
MKP	metoda konečných prvků
ODR	obyčejná diferenciální rovnice
PDR	parciální diferenciální rovnice
PML	Perfectly Matched Layer
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
NTNU	Norwegian University of Science and Technology

A Porovnání blízkého zvukového pole různých tvarů membrány

A.1 Kruhový píst, rozvinutelný tvar a kopule

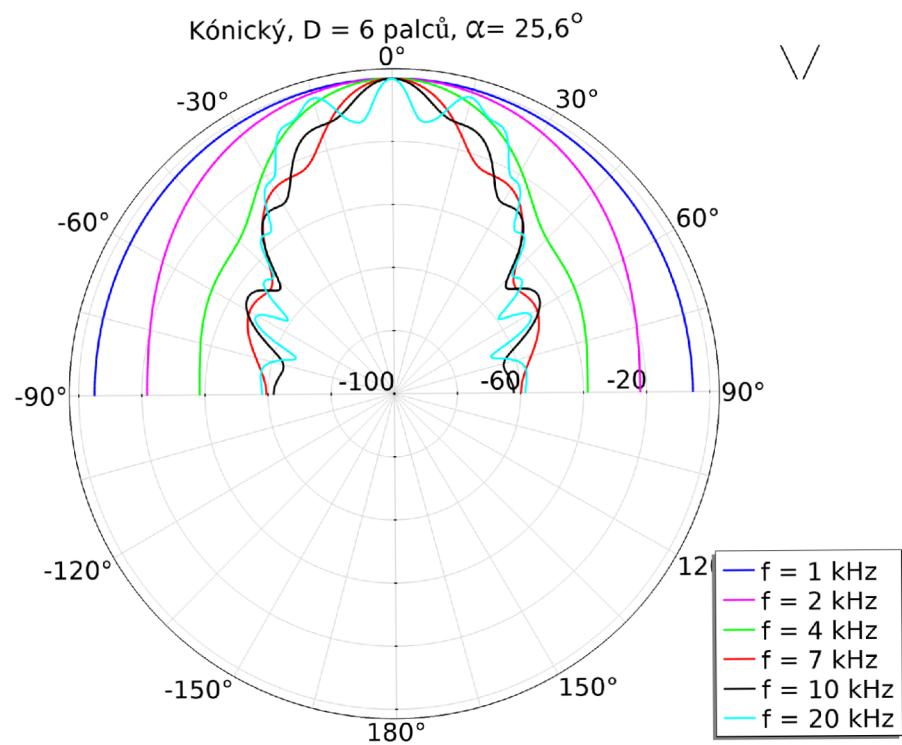
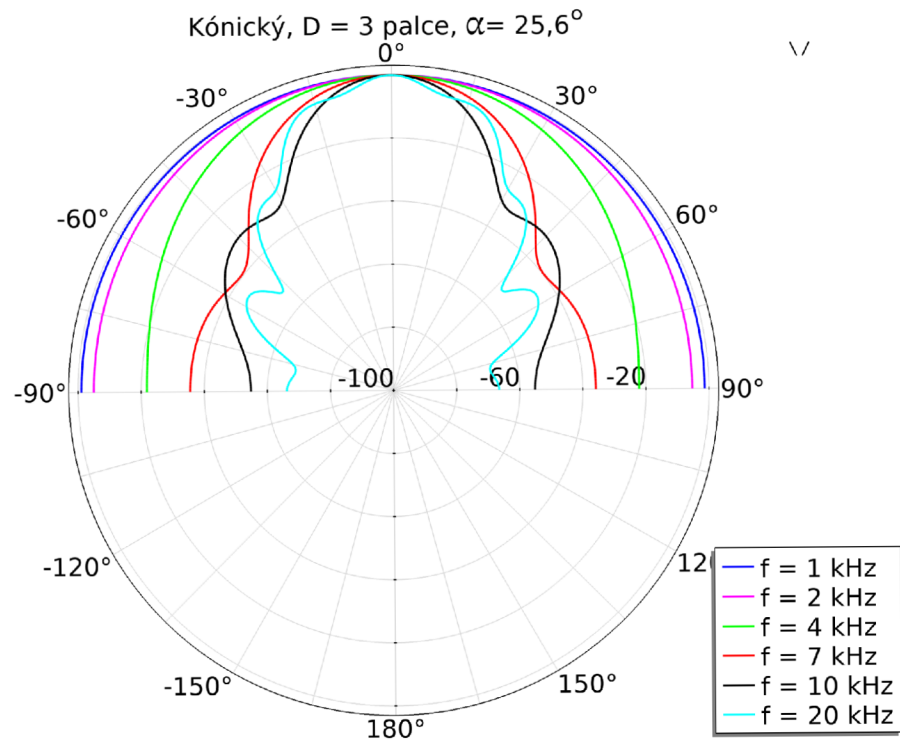


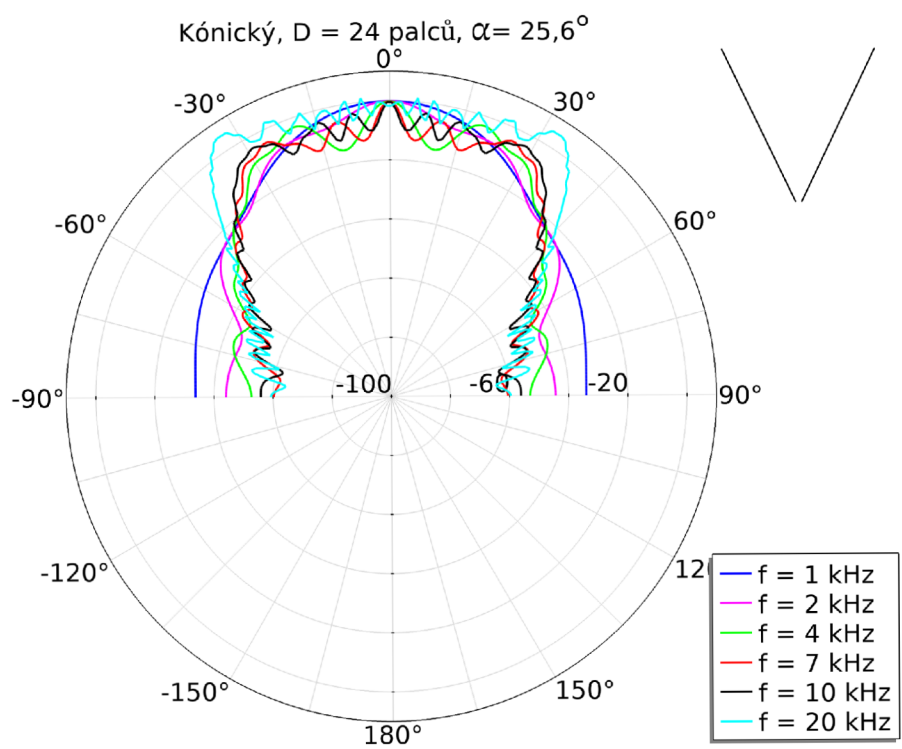
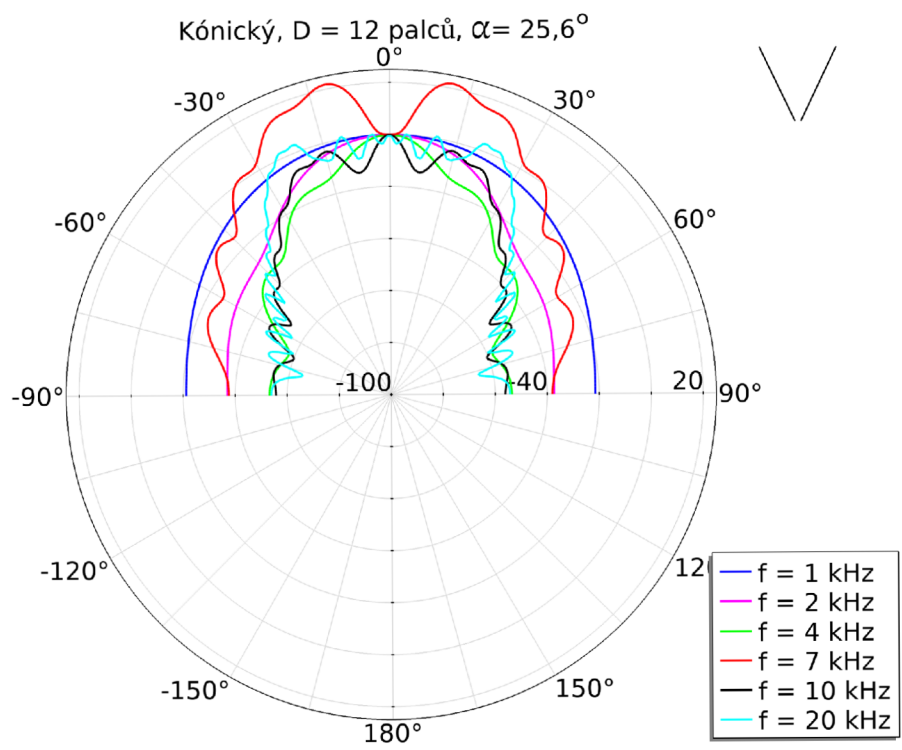
A.2 Tři varianty kuželovitého tvaru kruhového průřezu



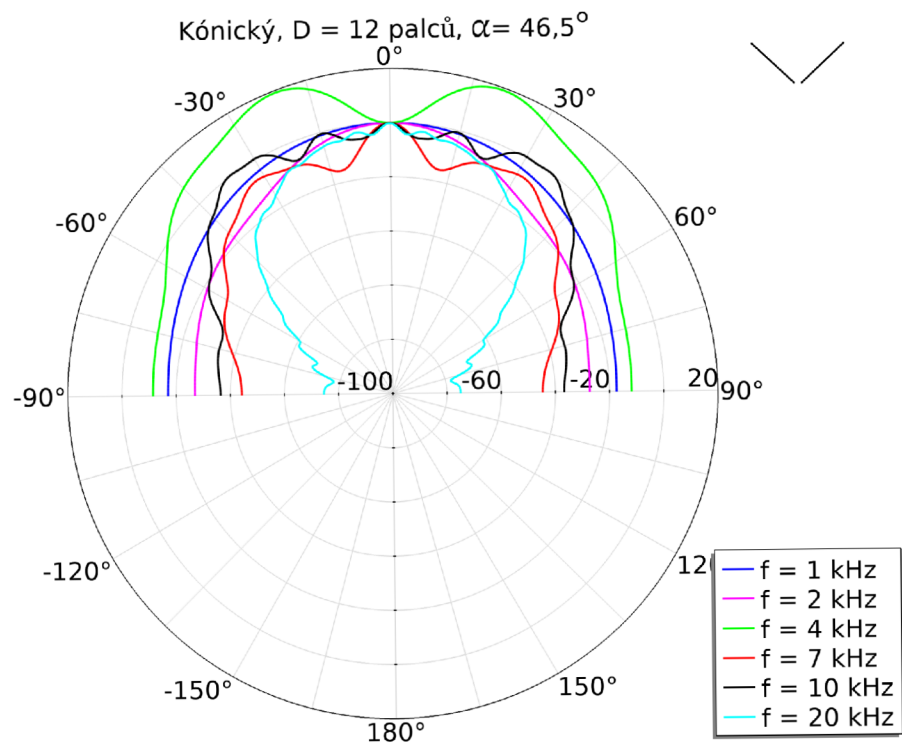
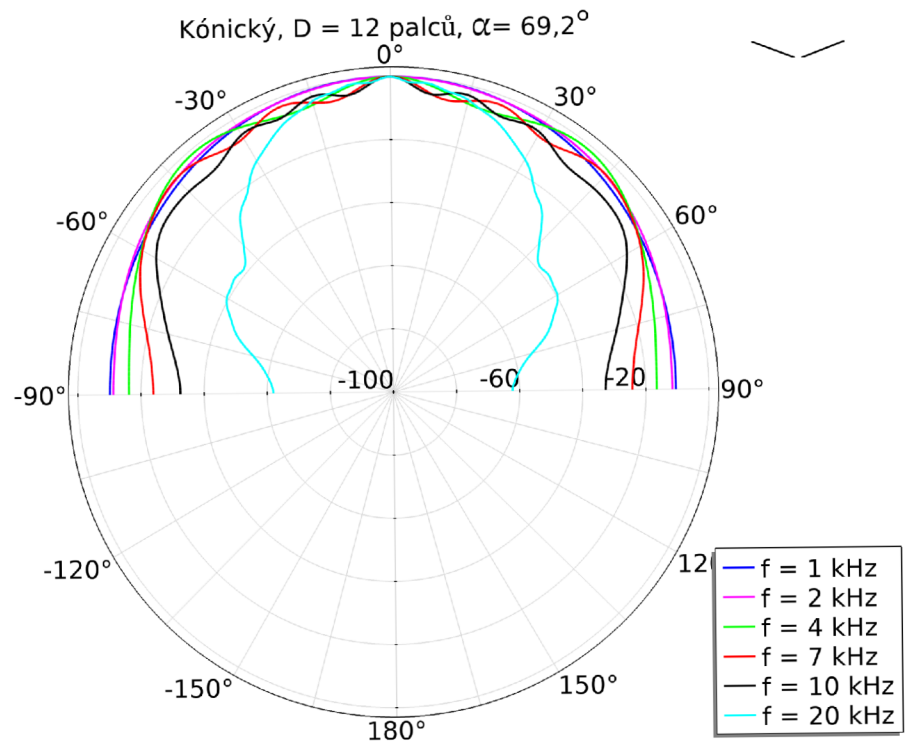
B Směrové charakteristiky zvukovodů

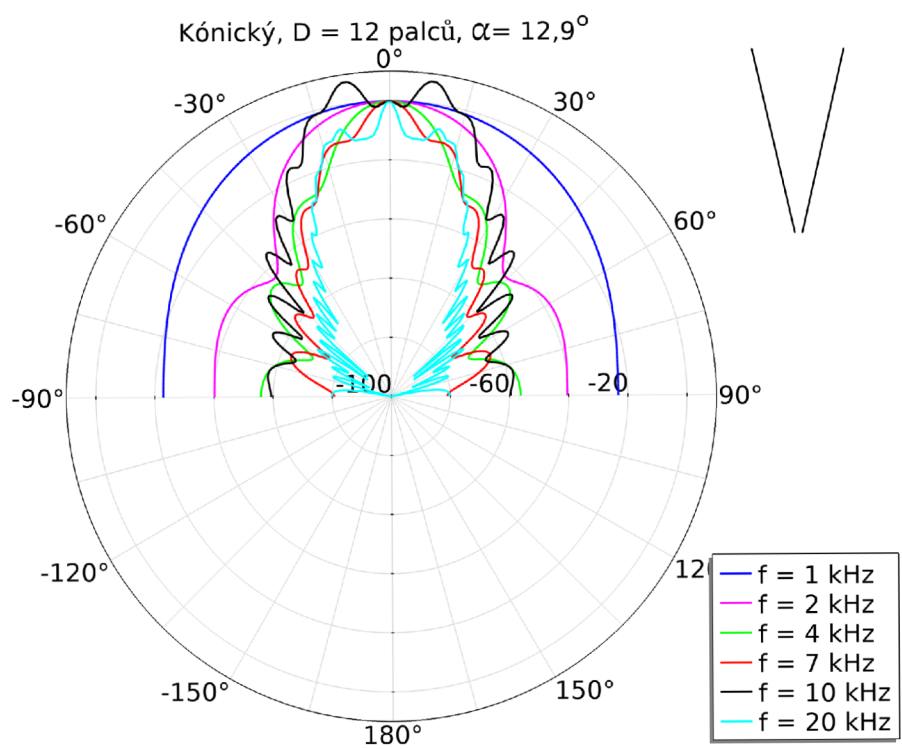
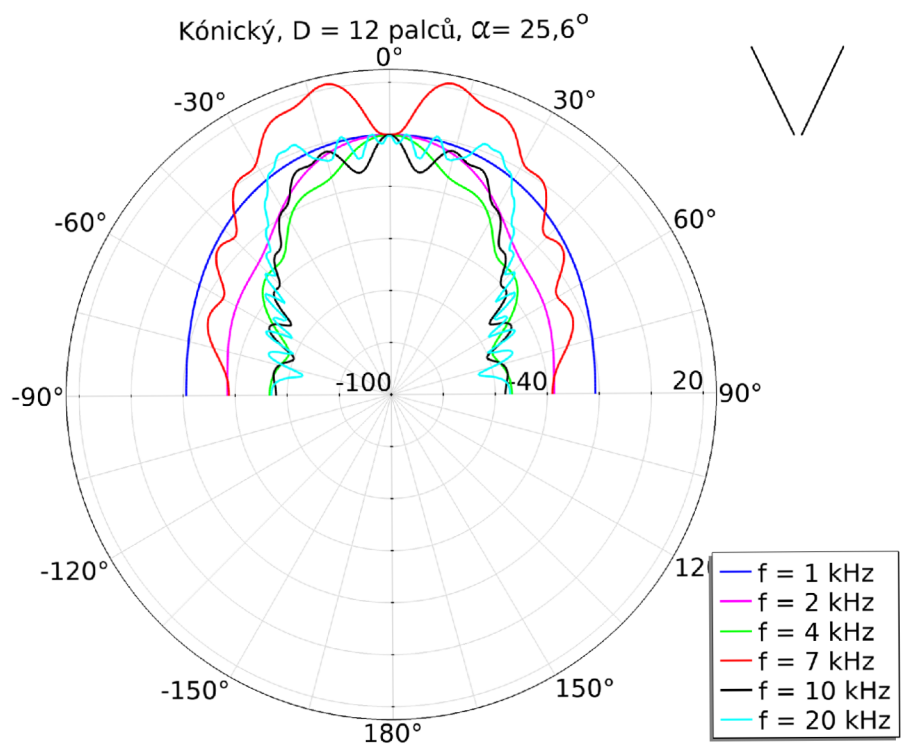
B.1 Kónický tvar, konstantní úhel



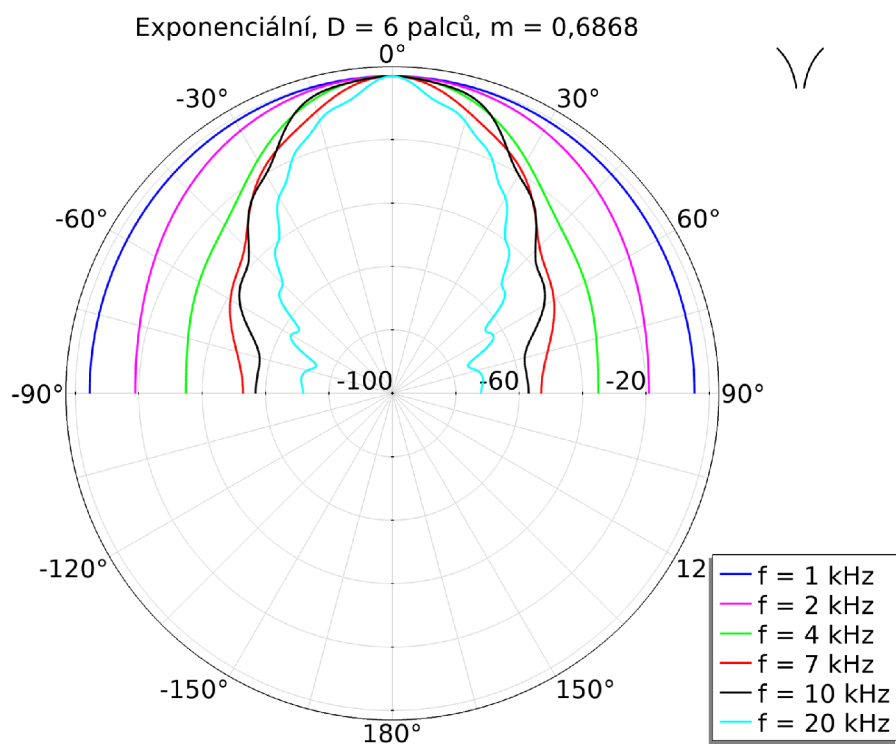
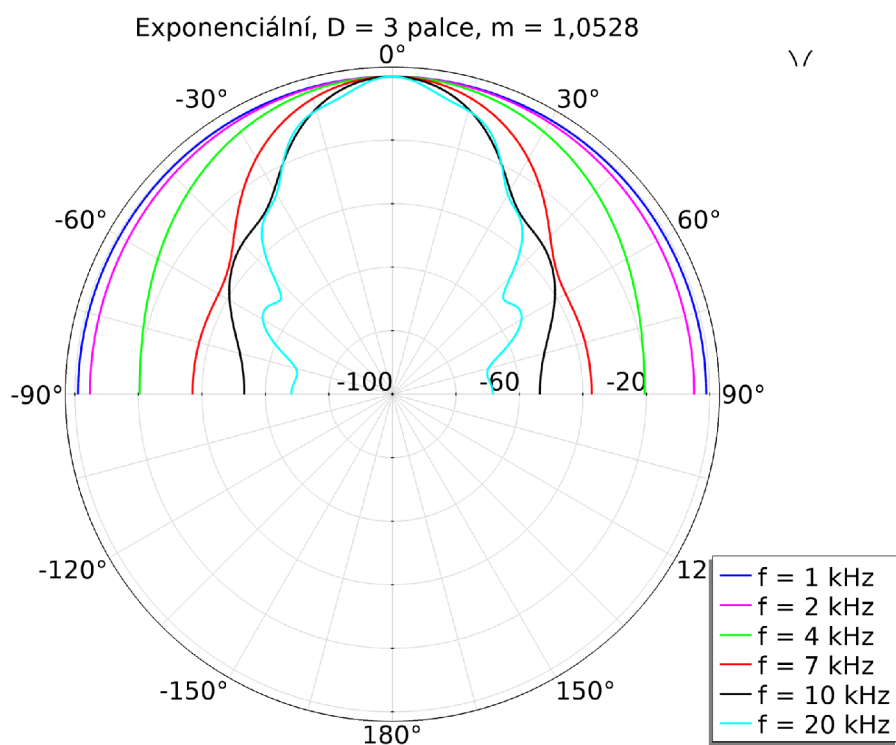


B.2 Kónický tvar, konstantní průměr ústí D

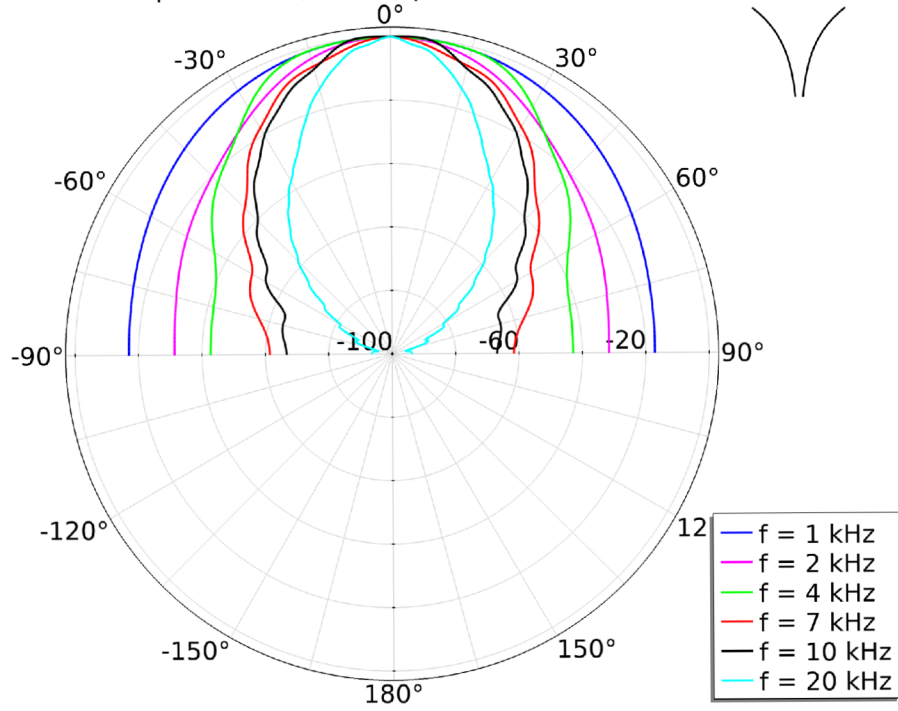




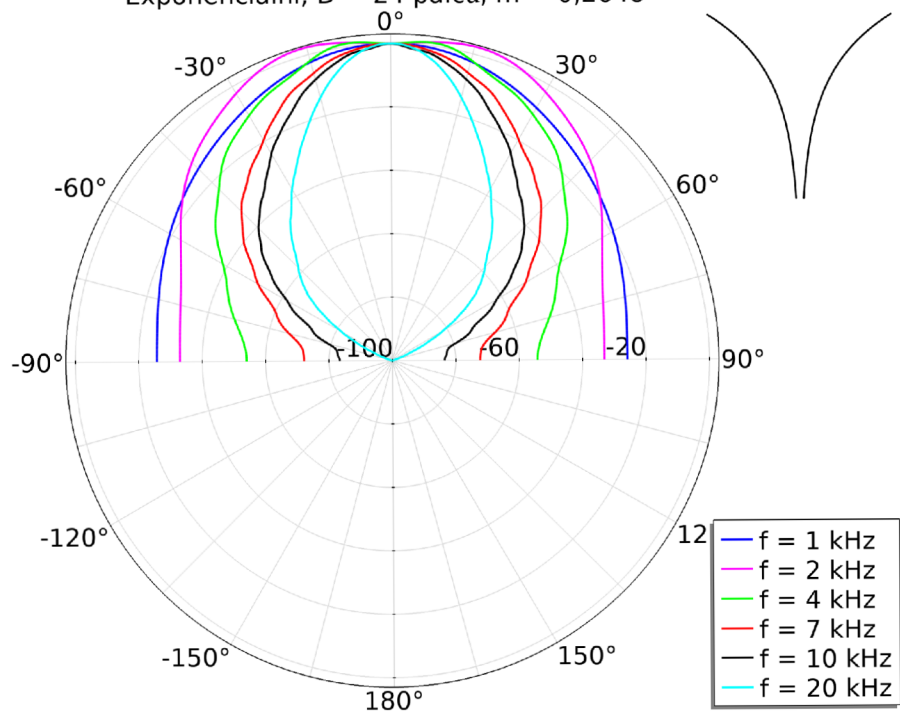
B.3 Exponenciální tvar, poměr průměru ústí D a délky je stejný jako u B.1



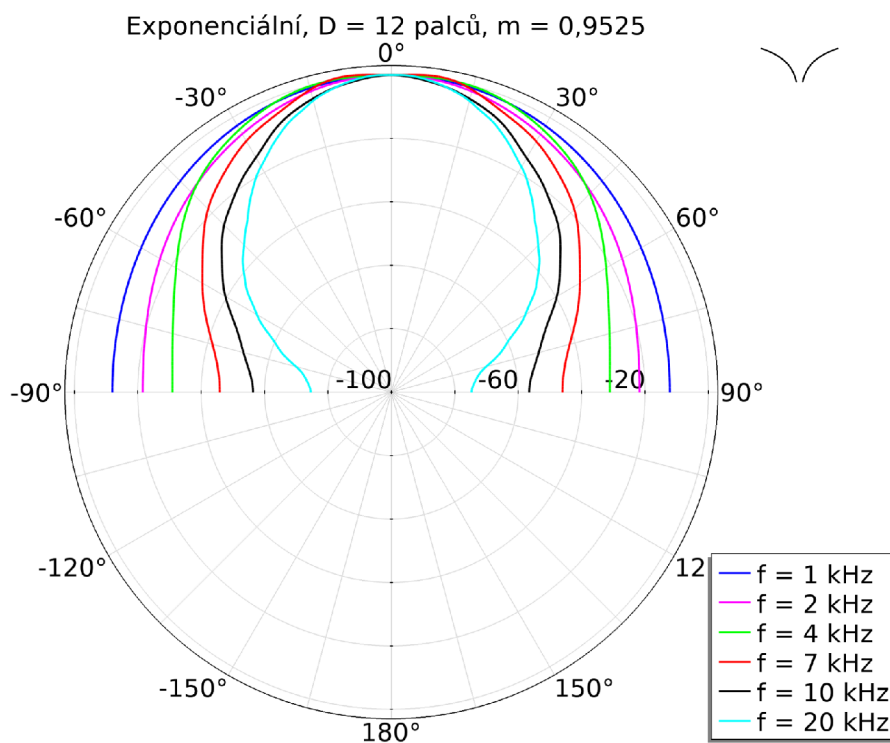
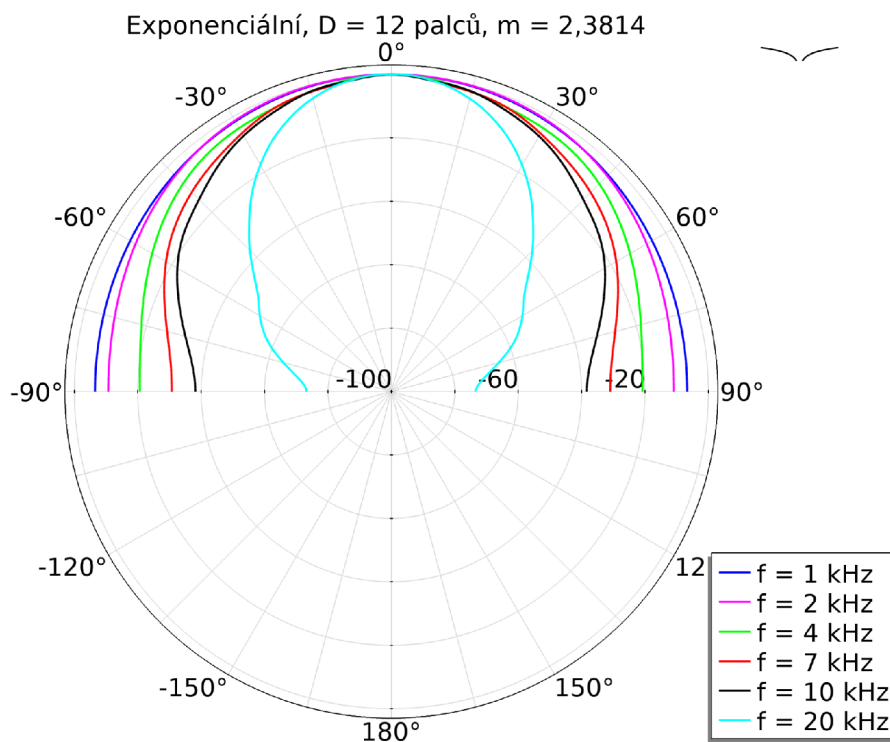
Exponenciální, $D = 12$ palců, $m = 0,4330$



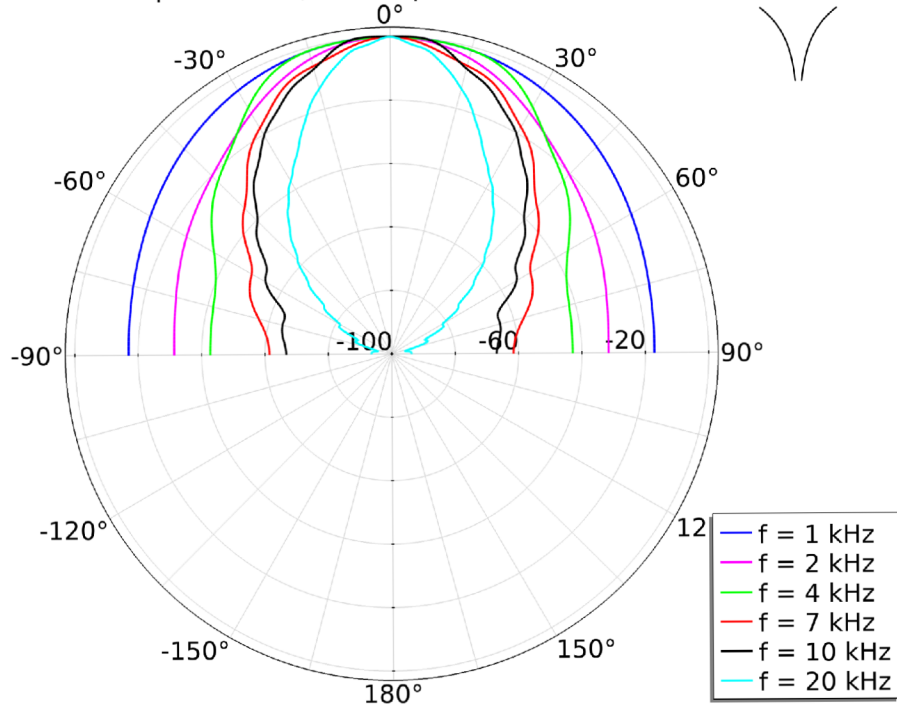
Exponenciální, $D = 24$ palců, $m = 0,2648$



B.4 Exponenciální tvar, konstantní průměr ústí D



Exponenciální, D = 12 palců, m = 0,4330



Exponenciální, D = 24 palců, m = 0,2648

