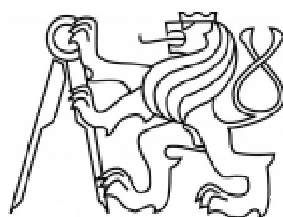


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Syntéza perkusních nástrojů



2014

Martin Šváb

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě závěrečných prací.

3. května 2014

Martin Šváb



## Abstrakt

*Diplomová práce se zabývá syntézou perkusních nástrojů prostřednictvím virtuální akustické syntézy, často též nazývané fyzikálním modelováním. Základem je řešení parciálních diferenciálních rovnic v diskrétní oblasti metodou konečných diferencí v časové oblasti. Rovnice představují modely těles částí hudebních nástrojů, které jsou rozvibrovány za účelem produkce zvukových signálů. Produktem praktické části práce je zcela nový aplikační software, který na základě vstupů od uživatele generuje zvuky perkusních nástrojů. Po porovnání výsledků syntézy s nahrávkami reálných nástrojů lze prohlásit generované zvuky za poměrně kvalitní a často blízké přirozeným zvukům perkusních hudebních nástrojů.*

**Klíčová slova:** *Virtuální akustická syntéza, perkusní (bicí) nástroje, fyzikální modelování, metoda konečných diferencí (rozdílů) v časové oblasti, aplikační software*

## Abstract

*The diploma thesis deals with the synthesis of percussion instruments through virtual acoustic synthesis, often also called physical modeling. The basis is solution of partial differential equations in discrete areas by the Finite Difference Time Domain method. Equations represent solid models parts of musical instruments, which are vibrated to produce audio signals. The product of the practical part is completely new application software which, based on inputs from the user, generates the sounds of percussion instruments. After comparing the results of the synthesis with recordings of real instruments can be generated sound declared as relatively good and often similar to the natural sounds of percussion instruments.*

**Key words:** *Virtual acoustic synthesis, percussion (drums) instruments, physical modeling, Finite Difference Time Domain method, application software*

# Obsah

Seznam obrázků	i
Seznam tabulek	iii
Seznam použitých zkratk	iv
Úvod	1
<b>1. Syntéza perkusních nástrojů</b>	<b>3</b>
1.1. Perkusní nástroje	3
1.1.1. Idiofony	5
1.1.2. Membranofony	5
1.1.3. Modelované nástroje	6
1.2. Virtuální akustická syntéza	6
1.2.1. Hlavní parametr rovnice	8
1.2.2. Analytické modely	9
1.2.3. Výběr metody	14
1.2.4. Metoda konečných diferencí v časové oblasti	15
<b>2. Výpočetní část aplikace</b>	<b>18</b>
2.1. Numerické modely	19
2.2. Okrajové podmínky	25
2.3. Buzení	27
2.4. Útlum	28
2.5. Rozšíření	31
2.6. Snímání výstupního signálu	31
2.7. Vykreslování a stav	32
2.8. Průběh syntézy	32
<b>3. Grafické uživatelské rozhraní aplikace</b>	<b>36</b>
3.1. Popis	36
3.1.1. Rovnice	38
3.1.2. Nástroj	39
3.1.3. Úder (buzení rovnice)	40
3.1.4. Okraje / Okraj a střed / Okraje a uchycení	42
3.1.5. Útlum	43
3.1.6. Místo snímání výstupního signálu	45
3.1.7. Grafické zobrazení	45
3.1.8. Obrázek	46
3.1.9. Parametry syntézy	47
3.1.10. Hlavní nabídka	50
3.1.11. Menu	51

3.1.12. Šum . . . . .	53
3.2. Nastavení syntézy a řešení problémů . . . . .	55
3.2.1. Nastavení syntézy . . . . .	56
3.2.2. Řešení problémů . . . . .	57
<b>4. Hodnocení</b>	<b>60</b>
4.1. Možnosti aplikace . . . . .	60
4.2. Porovnání s reálnými nástroji . . . . .	64
4.2.1. Metalofon . . . . .	65
4.2.2. Xylofon . . . . .	66
4.2.3. Rámový buben . . . . .	66
4.2.4. Činel . . . . .	67
4.2.5. Zvon . . . . .	68
4.3. Nové zvuky . . . . .	68
<b>Závěr</b>	<b>69</b>
<b>Reference</b>	<b>71</b>
<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>74</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>75</b>
<b>Přílohy</b>	<b>76</b>

## Seznam obrázků

1.	Telharmonium Thaddeuse Cahilla, rok 1897 (zdroj: dostupné z [3])	2
2.	Xylofon, kolem roku 1900, Sierra Leone (zdroj: dostupné z [7])	6
3.	Rámový buben, průměr 47.5 cm, 19. století, Dakota (zdroj: dostupné z [8])	7
4.	Různé typy průřezů tyče (zdroj: vlastní)	11
5.	Ukázka způsobů aproximace první derivace pomocí diferencí v časové oblasti (zdroj: vlastní)	16
6.	Ukázka matice identity a matice druhé diskrétní derivace v prostorové oblasti (zdroj: vlastní)	21
7.	Exponenciála poklesu hlasitosti, délka signálu 1 s, doba dozvuku: 0.5 s, 1.0 s, 5.0 s (zdroj: vlastní)	29
8.	Ukázka změny spektrogramu signálu v závislosti na změně hodnoty parametru $T_{60}(\omega_2)$ , hodnoty jsou: 0.1 s, 0.5 s, 1.0 s (zdroj: vlastní)	30
9.	Základní vývojový diagram průběhu syntézy (zdroj: vlastní)	34
10.	Rozšířený vývojový diagram průběhu syntézy (zdroj: vlastní)	35
11.	Úvodní okno aplikace (zdroj: vlastní)	37
12.	Zadávání vlastního podélného průřezu tyče (zdroj: vlastní)	49
13.	Šum - modální okno aplikace (zdroj: vlastní)	54
14.	Doba trvání syntézy (zdroj: vlastní)	57
15.	Různé typy rovnic (zdroj: vlastní)	61
16.	Efekt připojení dutiny k membráně (zdroj: vlastní)	64
17.	Metalofon, tón C2 (zdroj: vlastní)	65
18.	Bodhran, běžný úder (zdroj: vlastní)	67
19.	Různé typy úderu (zdroj: vlastní)	77
20.	Různá šířka úderu (zdroj: vlastní)	79
21.	Různá místa středu úderu (zdroj: vlastní)	81
22.	Různá tuhost paličky (zdroj: vlastní)	83
23.	Různé způsoby uchycení tyče (zdroj: vlastní)	85
24.	Různé způsoby uchycení plochy (zdroj: vlastní)	87
25.	Různá místa snímání výstupního signálu (zdroj: vlastní)	89
26.	Různé hodnoty parametru Theta (zdroj: vlastní)	91
27.	Různé podélné průřezy tyče (zdroj: vlastní)	93
28.	Různá míra nelinearity (rychlosti úderu) (zdroj: vlastní)	95
29.	Různý počet aproximačních uzlů (zdroj: vlastní)	97
30.	Různé průřezy tyče (zdroj: vlastní)	99
31.	Různé typy materiálů tyče (zdroj: vlastní)	101
32.	Zvláštní typy materiálů tyče (zdroj: vlastní)	102
33.	Různá napětí membrány (zdroj: vlastní)	104
34.	Různé poměry stran plochy (zdroj: vlastní)	106
35.	Různé souřadné soustavy (zdroj: vlastní)	109
36.	Xylofon, tón C2 (zdroj: vlastní)	112

37. Značky použité ve vývojových diagramech (zdroj: dostupné z [\[24\]](#)) 117



## Seznam tabulek

1.	Hudební dynamika a rychlost úderu (zdroj: dostupné z [11]) . . . .	40
2.	Různé typy rovnic - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	76
3.	Různé typy úderu - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	78
4.	Různá šířka úderu - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	80
5.	Různá místa středu úderu - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	82
6.	Různá tuhost paličky - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	84
7.	Různé způsoby uchycení tyče - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	86
8.	Různé způsoby uchycení plochy - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	88
9.	Různá místa snímání výstupního signálu - nastavení (zdroj: vlastní)	90
10.	Různé hodnoty parametru Theta - nastavení (zdroj: vlastní) . . . .	92
11.	Různé podélné průřezy tyče - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	94
12.	Různá míra nelinearity (rychlosti úderu) - nastavení (zdroj: vlastní)	96
13.	Různý počet aproximačních uzlů - nastavení (zdroj: vlastní) . . . .	98
14.	Různé průřezy tyče - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	100
15.	Různé typy materiálů tyče - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	103
16.	Různá napětí membrány - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	105
17.	Různé poměry stran plochy - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	107
18.	Různá velikost dutiny - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	108
19.	Různé souřadné soustavy - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	110
20.	Metalofon, tón C2 - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	111
21.	Xylofon, tón C2 - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	113
22.	Bodhran, běžný úder - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	114
23.	Činel - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	115
24.	Zvon - nastavení (zdroj: vlastní) . . . . .	116

## Seznam použitých zkratk

FDTD	Metoda konečných diferencí v časové oblasti (z anglického "Finite Difference Time Domain")
FFT	Rychlá Fourierova transformace (z anglického "Fast Fourier Transform")
GUI	Grafické uživatelské rozhraní (z anglického "Graphical User Interface")
PC	osobní počítač (z anglického "Personal Computer")
1D	jednorozměrné (těleso - ve smyslu jednoho převládajícího rozměru nad ostatními)
2D	dvourozměrné (těleso - ve smyslu dvou převládajících rozměrů nad třetím)

## Seznam použitých symbolů

$b$	šířka tyče, m
$c$	vlnová rychlost, $\text{m s}^{-1}$
$c_0$	vlnová rychlost ve výplni dutiny, $\text{m s}^{-1}$
$c_M$	vlnová rychlost v materiálu membrány, $\text{m s}^{-1}$
$D$	ohybová tuhost plátu, $\text{Pa m}^4$ ( $\text{N m}^2$ )
$\mathbf{D}_{\mathbf{xx}}$	operátor druhé prostorové diference v maticové podobě
$e_{t-}$	operátor zpětného časového posunutí
$e_{t+}$	operátor dopředného časového posunutí
$E$	Youngův modul pružnosti, Pa
$f$	frekvence, Hz
$h$	prostorový krok diference na jednotkovém rozměru, –
$H$	výška tyče, m
$H_0$	konkrétní tloušťka tyče, m
$\mathbf{I}$	operátor identity v maticové podobě
$k$	časový krok, s
$K$	moment setrvačnosti průřezu, $\text{kg m}^{-2}$
$L$	rozměr, m
$r$	poloměr průřezu tyče, m
$r_1$	první z poloměrů průřezu tyče s plochou mezikružší, m
$r_2$	druhý z poloměrů průřezu tyče s plochou mezikružší, m
$S$	plocha, $\text{m}^2$
$t$	čas, s
$T$	napětí membrány, $\text{N m}^{-1}$
$T_0$	napětí membrány na jednotkovou délku, $\text{N m}^{-1}$
$T_{60}$	doba dozvuku (pokles o 60 dB), s
$u$	proměnná, reprezentuje výchylky konkrétních bodů tělesa, m
$\mathbf{u}$	vektor všech bodů tělesa
$u_l^n$	hodnota výchylky v prostorovém bodě $l$ a časovém okamžiku $n$
$\mathbb{U}$	prostorový jednotkový interval
$v_\Phi$	fázová rychlost
$v_g$	grupová rychlost
$V_0$	objem dutiny, $\text{m}^3$
$x$	prostorová bezrozměrná nezávislá proměnná, –
$\alpha$	volný parametr rovnice, –
$\beta$	vlnové číslo
$\gamma$	vlnová rychlost, $\text{s}^{-1}$ (hlavní parametr vlnové rovnice)
$\gamma_1$	vlnová rychlost, $\text{s}^{-1}$ (parametr rovnice)
$\delta$	diskrétní derivace (diference)
$\delta_{t-}$	operátor zpětné časové diference
$\delta_t$	operátor centrální časové diference

$\delta_{t+}$	operátor dopředné časové diference
$\delta_{tt}$	operátor druhé časové diference
$\delta_{xx}$	operátor druhé prostorové diference
$\delta_{xxxx}$	operátor čtvrté prostorové diference
$\delta_{\Delta\boxplus}$	pětibodový Laplaceův operátor diference
$\delta_{\Delta\boxtimes}$	pětibodový diagonální Laplaceův operátor diference
$\Delta$	Laplaceův operátor
$\eta$	podmínka stability
$\theta$	volný parametr rovnice, –
$\kappa$	parametr tuhosti - hlavní parametr rovnice pro tuhé těleso
$\kappa_0$	stejně jako $\kappa$ ovšem závislé na průřezu tyče
$\lambda$	vlnová délka, m
$\mu_x$	centrální časový průměrovací operátor
$\nu$	Poissonovo číslo, –
$\rho$	hustota materiálu, $\text{kg m}^{-3}$
$\rho_S$	plošná hustota membrány, $\text{kg m}^{-2}$
$\sigma_0$	frekvenčně nezávislý parametr útlumu, $\text{s}^{-1}$
$\sigma_1$	frekvenčně závislý parametr útlumu, $\text{s}^{-1}$
$\phi$	normovaná funkce tloušťky tyče, –
$[\phi]$	$= (\mu_{xx}\phi^3)/\phi^2$
$\Phi$	Airyho funkce
$\omega$	úhlová frekvence, $\text{rad s}^{-1}$
$\omega_1$	1. frekvence, na níž je požadována ovladatelná doba dozvuku, Hz
$\omega_2$	2. frekvence, na níž je požadována ovladatelná doba dozvuku, Hz
1	ve vztahu (36) a (38) operátor identity, jina číslo

# Úvod

Předložená práce si klade za cíl vytvořit aplikační software, jehož primárním účelem bude synteticky vytvářet zvuk vydávané perkusními hudebními nástroji.

Elektronické hudební nástroje, které vytváří zvuk syntézou, bývají označovány jako syntezátory, syntetizéry, někdy také sytetizátory. Pojem *syntéza* se ve spojení s hudbou a hudebními nástroji poprvé objevuje již v roce 1895, kdy jej použil Thaddeus Cahill při popisu svého patentu na "Zařízení pro elektronické generování hudby", viz obrázek 1.. Dnes mají syntezátory nejrůznější podoby, mohou být analogové i digitální, hardwarové nebo softwarové a rozmanité jsou rovněž způsoby jejich ovládání [1].

Historie syntézy zvuků je tedy relativně dlouhá a důležité mezníky jsou spjaty s vývojem elektroniky. První generace syntozátorů využívala především elektronky, druhá generace se vyznačuje nahrazením elektronek pomocí tranzistorů a generace třetí je charakterizována nasazením integrovaných obvodů. Čtvrtá a pátá generace se od předchozích odlišují zejména digitalizací nástrojů a mírou využití digitalizace. Konečně šestou generaci syntezátorů představují virtuální nástroje, založené na fyzikálním modelování hudebních nástrojů pomocí matematických rovnic [2].

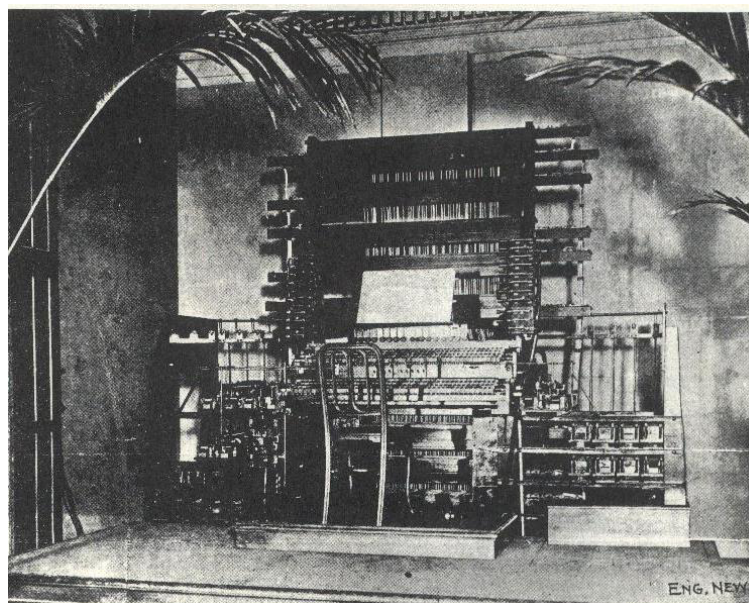
Motivací pro vytváření syntezátorů existuje celá řada. Hudebním umělcům slouží jako mocný nástroj pro tvorbu nových, neoposlouchaných a zajímavých zvuků, nad nimiž mají prakticky neomezenou kontrolu. Čím větší možnosti syntezátor poskytuje, tím složitější ovšem bývá požadovaný zvuk vyprodukovat, a na uživatele jsou kladeny jisté požadavky v hudebním i technickém vzdělání. Muzikanty začátečníky na druhou stranu osloví použití přednastavených možností a přístup k široké nabídce tónů většího množství hudebních nástrojů, které současné syntezátory běžně poskytují, a jejichž použití spočívá ve stisknutí jednoho tlačítka nebo klávesy. Amatérští hudební nadšenci ocení také nižší pořizovací náklady syntezátorů ve srovnání s klasickými hudebními nástroji, v případě rozměrnějších nástrojů přijatelnější nároky na prostor, a pro používání v domácích podmínkách také omezení hlasitosti zajištěné například výstupem pro sluchátka, což je především u bicích nástrojů takřka neocenitelné.

Současným trendem vývoje syntezátorů, jak bylo uvedeno výše, je používání virtuální akustické syntézy. Uživateli se tak dostává do rukou model fyzického tělesa reprezentující daný hudební nástroj. Výhodu kvalitních modelů představuje v první řadě možnost simulovat veškeré jevy mající vliv na výsledný akustický signál, což výrazně vylepšuje jeho kvalitu. Způsob kontroly nad zvukem se navíc přibližuje běžnému fyzikálnímu chápání světa. Obsluze tak pro změnu parametrů signálu stačí změnit například délku struny nebo napnutí membrány. Účinky těchto změn si lze představit jistě lépe, než u změny vyvolané zvýšením frekvence amplitudově modulující jinou frekvenci, která následně ještě frekvenčně moduluje určitý signál.

Využití virtuální akustické syntézy spočívá převážně v simulování zvuků běžně používaných hudebních nástrojů, pro které je dostupný jejich přijatelný matematický popis. Jednoduchou změnou parametrů je však dále možné vytvářet zvuky nové, založené například na extrémních rozměrech dutin nástrojů nebo sil napínajících struny a membrány, které by reálné objekty nemohly mít nebo by je nemohly vydržet. Virtuální akustická syntéza může dále sloužit k ověřování kvality modelů a pro návrh nových hudebních nástrojů.

Aplikace vytvořená v rámci praktické části diplomové práce by měla prostřednictvím virtuální akustické syntézy produkovat uměle vytvořené zvuky perkusních nástrojů na základě jednoduchých matematických modelů hlavních částí bicích hudebních nástrojů.

Práce jako taková si klade za cíl ověřit použitelnost těchto modelů ve spojení s vybranou metodou řešení rovnic představujících uvedené modely. Kvalita uměle vygenerovaných zvuků bude posuzována na základě porovnání s nahrávkami reálných hudebních nástrojů.



Obrázek 1. Telharmonium Thaddeuse Cahilla, rok 1897 (zdroj: dostupné z [3])

# 1. Syntéza perkusních nástrojů

Syntézu zvuku jako takovou je možné rozdělit do dvou kategorií. V prvním případě se jedná o snahu vyprodukovat zvuk, který co nejlépe imituje existující akustické nástroje. Druhý případ je motivován vytvořením nového, originálního zvuku, který se nevztahuje k žádnému přirozeně existujícímu zvuku [4]. Vzhledem k cíli této práce, tedy napodobit zvuk perkusních nástrojů, bude dále pojednáváno především o první z kategorií, nicméně alespoň na závěr bude věnován malý prostor i zvukům novým.

Napodobování zvuku reálného hudebního nástroje je zajímavý a poměrně složitý problém. Největší obtíže jsou způsobené především simulováním skutečných fyzikálních jevů doprovázejících vznik zvuku v hudebním nástroji. Jako příklad se v některé literatuře uvádí neperiodický zvuk u piána, který je způsoben úderem kladívka na strunu nebo rezonance sousedních strun. Ani čistý tón vydávaný hudebním nástrojem tedy není zcela vhodné jednoduše nahradit signálem, jehož spektrum obsahuje v celé své délce pouze soustavu statické posloupnosti diskretních čar spektra [4]. U perkusních nástrojů je tato problematika zvláště důležitá, neboť jejich zvuk je do značné míry ovlivněn právě úderem. V případě membranofonů navíc není zcela možné přesně určit jednotlivé diskretní frekvence, zvuk je z velké části tvořen šumy.

Metod, kterými je možné syntézu zvuku provádět, existuje značné množství. Vzhledem k povaze zvuku perkusních nástrojů jsou některé metody pro tento účel vhodné více, jiné méně. Problém nespočívá ve skutečnosti, že by nebylo možné jednotlivými metodami vytvořit zcela stejný zvuk. Obtížnost úlohy se ale může pro každou z metod významně lišit. Otázkou volby vhodné metody jsem se zabýval v projektu předcházejícím diplomové práci. Na základě teoretických poznatků i praktických pokusů jsem se rozhodl pro virtuální akustickou syntézu, často také nazývanou fyzikálním modelováním.

## 1.1. Perkusní nástroje

Perkusní (bicí) nástroje jsou definovány jako hudební nástroje, u kterých zvuk vzniká údery paliček, rukou nebo prstů do napjatých blan těchto nástrojů nebo přímo na jejich stěny. Řadí se mezi ně ale také i nástroje, které se rozeznávají třesením, škrábáním, drhnutím, dechem nebo dokonce smyčcem [5].

Bicí nástroje jsou jedny z nejstarších hudebních nástrojů, které kdy člověk využíval. Například kovové gongy a zvony se objevují přibližně 1000 let před naším letopočtem, kamenné gongy jsou známy z období 1500 let před naším letopočtem a používání prvních blanozvučných nástrojů, takzvaných rámových bubnů, je na území Egypta zdokumentováno již ve třetím tisíciletí před naším letopočtem. Kdy se poprvé objevily nejprimitivnější rytmické nástroje (různá škrábátka a chřestítka) není vůbec známo. Na druhou stranu bicí nástroje se stále hojně využívají i nyní a tyto nástroje se stále vyvíjí [5].

Využití bicích nástrojů je v současné době poměrně jasné. Používají se především jako hudební nástroje ve velmi širokém spektru žánrů, nejčastěji pro udávání rytmu skladeb. V době vzniku těchto nástrojů však většina z nich sloužila jako nástroje signální. Až o něco později došlo k využívání bicích nástrojů jako nástrojů rytmických při doprovodu rituálních, oslavných, válečných i loveckých tanců nebo například při náboženských obřadech. Svě využití perkusní nástroje našly také při válečných taženích [5].

Vzhledem k velkému počtu značně rozdílných bicích nástrojů je užitečné jejich rozdělení podle přesně daných pravidel. V současné době je nejpoužívanějším systémem pro třídění hudebních nástrojů Sachs-Hornbostelova klasifikace. Pro zařazení nástroje podle této klasifikace je důležitý způsob, kterým se v nástroji tvoří zvuk. Základní skupiny této klasifikace jsou:

- Idiofony - samozvучné nástroje, zvuk vzniká kmitáním tělesa nástroje;
- Membranofony - blanozvучné nástroje, zvuk vzniká kmitáním membrány;
- Chordofony - strunozvучné nástroje, zvuk vzniká kmitáním struny;
- Aerofony - vzduchozvучné nástroje, zvuk vzniká kmitáním vzduchu;
- Elektrofony - elektrické nástroje, zvuk je vytvářen elektricky;
- Hydrofony - vodozvучné nástroje, zvuk vzniká kmitáním vody [6].

První čtyři skupiny se řadí mezi základní, poslední dvě byly přidány později. Pokud jde o hydrofony, jedná se spíše o teoretickou skupinu.

Vzhledem k zaměření práce má význam dále hovořit pouze o prvních dvou skupinách. Následuje tedy rozepsání do druhé úrovně vybraných skupin podle Sachs-Hornbostelovy klasifikace:

- Idiofony:
  - úderové (nástroj je rozechvíván úderem);
  - trsací (nástroj je rozechvíván vychýlením kmitající části z klidové polohy);
  - třecí (kmity jsou vybuzovány třením);
  - vzduchové (nástroj je rozezvučen proudem vzduchu).
- Membranofony:
  - úderové (membrána nástroje je rozechvívána úderem);
  - trsací (kmity jsou vybuzovány trsáním);
  - třecí (kmity jsou vybuzovány třením) [6].

Dalším dělením jak idiofonů, tak i membranofonů, je na nástroje s vyladěným tónem a nástroje se zvukem neurčité výšky [5].



### 1.1.1. Idiofony

Hudební nástroje z kategorie idiofonů vydávají zvuk díky rozechvění jejich vlastní hmoty. Název vznikl spojením dvou řeckých slov, a sice ídios, tedy "vlastní" a foné, což znamená "hlas". Je tím velmi dobře vystižena základní podstata jmenovaných nástrojů [5].

Vzhledem k velkému počtu samozvučných bicích nástrojů je potřebné jejich další dělení. Jako užitečné hledisko se jeví materiál, z něhož jsou vyrobeny. Pro výsledný zvuk je materiál jednou z klíčových charakteristik. Idiofony je tak možné dále rozdělit do skupin:

- dřevěné - xylofony;
- kovové - metalofony;
- kamenné - lithofony;
- skleněné - krystalofony;
- ostatní - elasmatofony [5].

### 1.1.2. Membranofony

Jak již bylo uvedeno výše, zvuk vzniká rozkmitáním membrány. Touto membránou může být blána nebo kůže, buď organického původu (většinou vydělaná telecí kůže) nebo umělohmotná, která je napjatá na ozvučnou skříň. Ozvučné skříně se vyskytují v různých tvarech a mohou být vyrobeny z různých materiálů, například ze dřeva, kovu, umělé hmoty, atd. Připevnění blány k lubům bývá pevné nebo laditelné [5].

Podle počtu blan rozlišujeme membranofony na nástroje s jednou blanou a nástroje se dvěma blanami. Druhá blána se nazývá ozvučnice [5].

Zajímá-li nás tón vydávaného zvuku, pak je možné konstatovat, že blanozvučné nástroje jsou nejčastěji bez určité tónové výšky. Výjimkou jsou pouze tympány, které je možné přeladovat i v průběhu hry, a zdokonalený nástroj nazývaný boo-bam. Alespoň přibližné naladění je však možné téměř u všech jednoblanných nástrojů. Nezávisle na tom, ze kterého světadílu konkrétní nástroje pochází, téměř vždy se vyskytují v sestavě nejméně dvou kusů různě naladěných [5].

Luby blanozvučných nástrojů jsou většinou vyrobeny z kovu nebo ze dřeva. Vyskytují se ale také například keramické. Průměr a výška nástroje se můžou u jednotlivých bubnů značně lišit. Čím větší průměr a výška lubů, tím je zvuk hlubší a temnější. Také se tím prodlužuje dozvuk. Rovněž tvar korpusu jednotlivých nástrojů je různý. Setkat se můžeme s tvary kotle, soudku, válce, obráceného kolmého jehlanu a dalšími [5].

### 1.1.3. Modelované nástroje

Pomocí aplikace, vytvořené v rámci praktické části diplomové práce, by mělo být možné modelovat jak úderové idiofony nejrůznějších materiálů a tvarů, tak úderové membranofony s jednou blanou. Uvedené typy nástrojů jsem pro potřeby aplikace rozdělil do dvou základních skupin podle počtu převládajících rozměrů nástroje.

První skupinou jsou *jednorozměrné nástroje* (dále také 1D), u kterých jeden z rozměrů tělesa vydávajícího zvuk převládá nad ostatními. Patří mezi ně především metalofon, xylofon, lithofon, různá ozvučná dřívka a podobně. Ukázka je na obrázku 2..



Obrázek 2. Xylofon, kolem roku 1900, Sierra Leone (zdroj: dostupné z [7])

Druhou skupinu nástrojů tvoří *dvourozměrné nástroje* (dále také 2D), což jsou nástroje, u kterých je pro vznik zvuku klíčové vibrování plochy. Vibrující plochou může být míněna kromě jiného také membrána. Ta je zpravidla nejdůležitější částí bubně a skupina tak zahrnuje v podstatě všechny typy bubně s jednou membránou. Příklad uvádí obrázek 3.. Dále je možné pomocí dvourozměrné vibrující plochy modelovat zvuk různých plátů. Pod tímto označením si představme například činely. Modelování vibrující plochy lze také teoreticky využít pro syntézu zvuků většiny zvonů. U těch sice vibruje celé těleso, nicméně převážná část zvuku vychází ze spodní otevřené části zvonu, tedy určitou plochou.

## 1.2. Virtuální akustická syntéza

Virtuální akustická syntéza a její praktické využití v oblasti generování zvuků hudebních nástrojů představuje důležitý mezník v historii syntezátorů. Vzhledem ke způsobu získávání zvuku touto metodou je též často nazývána *fyzikálním modelováním*. Poprvé byl syntezátor využívající virtuální akustické syntézy představen v roce 1993 společností YAMAHA a obsahoval modely především dechových nástrojů [4].

V projektu vypracovaném před diplomovou prací byla pozornost zaměřena na výběr vhodného způsobu generování zvuku perkusních nástrojů. Na základě



Obrázek 3. Rámový buben, průměr 47.5 cm, 19. století, Dakota (zdroj: dostupné z [8])

výsledků projektu jsem se rozhodl pro využití právě virtuální akustické syntézy ve své aplikaci. Jde navíc o poměrně mladý způsob syntézy a často bývá považován za budoucnost odvětví syntézy hudebních nástrojů. Možnosti virtuální akustické syntézy jsou téměř neomezené a jediným faktorem, bránícím jejímu širšímu využití, představují především nároky kladené na výpočetní techniku. Pokud jde o fyzikální modelování obecně, využívá jej velmi široké spektrum oborů. Jmenujme například modely strojních součástí i celých strojů, stavebních konstrukcí, meteorologické modely, a o oblasti modelování elektromagnetických polí ani nemluvě.

Princip, na kterém je fyzikální modelování založeno, je možné popsat následujícím způsobem. Nejprve se vytvoří model nástroje, jehož zvuk si přejeme napodobit. Vzhledem k požadavku provést syntézu zvuku pomocí určitého výpočetního systému je model nástroje zpravidla reprezentován matematickou rovnicí, případně soustavou rovnic. Následně se vybere vhodná metoda, kterou bude rovnice řešena. Samotná syntéza pak probíhá tak, že do rovnice je zavedeno její buzení. Fyzikálně si lze pod tímto pojmem představit například úder paličkou do těla hudebního nástroje. Těleso se následkem úderu rozkmitá. Totéž se stane s rovnicí představující model tělesa. Rovnice je opakovaně řešena, čímž v podstatě dostáváme aktuální tvar vlnícího se tělesa v jednotlivých časových okamžicích. Akustický výstup se získává zaznamenáváním polohy vybraného bodu tělesa v jednotlivých časových okamžicích.

Na úvod se podívejme na vybrané rovnice, které mohou sloužit jako modely těles využívaných pro syntézu perkusních nástrojů. Dále budou uvedeny nejvhodnější metody pro řešení těchto modelů, a výběr jedné z nich, jež bude využita pro potřeby vlastní aplikace. Na závěr této části textu krátce pojednejme o zvolené metodě. Nejprve však věnujme okamžik vysvětlení důležitého pojmu *hlavní parametr rovnice*.

### 1.2.1. Hlavní parametr rovnice

Každý z dále uvedených modelů je možné přepsat do podoby, ve které se vyskytuje parametr  $\gamma$  (u vlnových rovnic) nebo  $\kappa$  (u rovnic pro tuhá tělesa). Parametry mají pro vlastnosti rovnice zásadní význam. Určují velikost fázové ( $v_\Phi$ ) a grupové ( $v_g$ ) rychlosti. Fázová rychlost představuje rychlost šíření bodů vlnění majících shodnou fázi [9]. Grupová rychlost je definována vztahem [10]:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}. \quad (1)$$

Symbol  $\omega$  značí úhlovou frekvenci

$$\omega = 2\pi f, \quad (2)$$

kde  $f$  - frekvence, Hz;  $\beta$  - vlnové číslo,  $\text{m}^{-1}$ ; přičemž

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

a  $\lambda$  - vlnová délka, m. Grupová rychlost závisí na frekvenci. Skládá-li se vlna z více harmonických postupných vln různých frekvencí, pak se tvoří vlnové grupy, česky nazývané vlnové balíky. Grupová rychlost je rychlostí šíření celého balíku [10].

Pro vlnovou rovnici je vztah parametru  $\gamma$  a obou rychlostí [11]:

$$\gamma = v_g = v_\Phi. \quad (4)$$

Ve všech ostatních rovnicích parametr  $\kappa$  určuje fázovou rychlost vztahem [11]:

$$v_\Phi(\beta) = \kappa |\beta|, \quad (5)$$

a grupovou rychlost vztahem [11]:

$$v_g(\beta) = 2\kappa |\beta|. \quad (6)$$

Vzhledem k obdobnému významu parametrů  $\gamma$  a  $\kappa$  jsou tyto parametry pro potřeby této práce dále označovány souhrnným pojmem *hlavní parametr rovnice*. Přesná interpretace parametru  $\gamma$  je podle výše uvedeného v podstatě vlnová rychlost,  $\text{s}^{-1}$ ; ovšem prostorově bezrozměrná, normovaná na jednotkovou délku. Symbol  $\kappa$  pak značí parametr tuhosti v odpovídajících rovnicích. Veškeré rovnice, ve kterých je  $\kappa$  hlavním parametrem, budou dále v textu označovány souhrnným pojmem *rovnice pro tuhá tělesa*.

### 1.2.2. Analytické modely

Pojem analytický model určitého objektu, či v tomto konkrétním případě hudebního nástroje, v oblasti fyzikálního modelování představuje konkrétní rovnici nebo soustavu rovnic sloužících k popisu vibrací daného tělesa. Modely mohou být různé, některé více, jiné méně přesné. Liší se také svou složitostí. Vždy se vybírají s ohledem na nejvýznamnější vlastnosti daného hudebního tělesa. Existují různé modely pro struny, tyče, dutiny (rezonátory), membrány atd. Vývoj těchto modelů patří do kompetence fyziků. Prívlastek "analytické" znamená, že modely jsou reprezentovány rovnicí definovanou ve spojitém čase a prostoru. Tyto rovnice umožňují stanovit přesné řešení, ale vyhovují pouze v případě aplikace na jednoduché geometrické útvary a za speciálních podmínek použitých na okrajích vymezených oblastí. Rovnice modelů mohou být obecně různé (obyčejné, algebraické, atd.). V této práci budou však uvažovány pouze parciální diferenciální rovnice (a jejich soustavy).

Všechny níže uvedené modely jsou implementovány do vlastní aplikace. Jedná se o vlnovou rovnici, použitou jak v jednorozměrné podobě pro popis vibrací tyčí, tak ve své dvourozměrné podobě, kdy modeluje tenké pláty a především membrány. Dále je implementován Euler-Bernoulliho model a jeho modifikace, sloužící jako kvalitní model vibrací jednorozměrných tuhých těles (tyčí). Nakonec je představen Kirchhoffův model tenkého plátu a jeho obdoba pro nelineární případy, Von Kármánův model tenkého plátu.

*Vlnovou rovnici* lze bezesporu zařadit mezi nejvýznamnější rovnice fyziky. Je to hyperbolická parciální diferenciální rovnice druhého řádu. Popisuje celou řadu vlnění a uplatnění nalézá v akustice, optice, elektromagnetismu, nebo v mechanice. Jednorozměrnou podobu rovnice objevil Jean le Rond d'Alembert v roce 1746 při studiu vibrujících strun [12].

Jednorozměrná podoba vlnové rovnice [12]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (7)$$

kde  $u$  - amplituda výchylky, m;  $t$  - čas, s;  $x$  - umístění daného bodu v prostoru normovaném na jednotkovou velikost, -;  $c$  - vlnová rychlost m s<sup>-1</sup>. Do souvislosti s fyzikálními vlastnostmi reálných objektů dává konstantu  $c$  vztah [12]

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (8)$$

Při tomto dosazení je modelována tuhá tyč. Význam použitých symbolů je následující:  $E$  - Youngův modul pružnosti v tahu daného materiálu, Pa;  $\rho$  - hustota materiálu, kg m<sup>-3</sup>. Pomocí jiného vzorce je možné modelovat například strunu [11]. Často uváděná podoba rovnice (7) je [12]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \Delta u. \quad (9)$$

Výhoda pozmeněného tvaru spočívá v jeho možném použití i pro více rozměrů. Symbol  $c$  má pro tuhá tělesa stejný význam jako výše, symbol  $\Delta$  představuje Laplaceův operátor.

Vzhledem k tomu, že vlnová rovnice ve dvourozměrném tvaru je vhodným kandidátem pro popis vlnění membrán, dodávám vztah pro konstantu  $c$  z rovnice (9), která je určena parametry vztahujícími se právě k vlastnostem membrán. Jde o vztah [13]

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho_S}}, \quad (10)$$

kde  $\rho_S$  - plošná hustota membrány,  $\text{kg m}^{-2}$ ;  $T$  - napětí membrány  $\text{N m}^{-2}$ .

Pro praktické využití je výhodný tvar rovnice v podobě využívající v rovnici (9) místo  $c^2$  parametr  $\gamma^2$ . Symbol  $\gamma$  představuje hlavní parametr rovnice, jeho hodnota je dána vzorcem [11]

$$\gamma = \frac{c}{L} \quad (11)$$

a přínosem provedené úpravy je normování rovnice na jednotkový rozměr ( $L$  - rozměr, m).

Přestože je vlnová rovnice pro fyziku velmi významná, pravdou je, že pro modelování transversálních vibrací jednorozměrného tělesa (tenké tyče) se příliš nehodí. Za tímto účelem je vhodnější použít Euler-Bernoulliho model.

*Euler-Bernoulliho model* vibrující tyče v podstatě vychází z Euler-Bernoulliho teorie nosníků, někdy také nazývanou klasickou teorií nosníků. Představuje zjednodušenou lineární teorii pružnosti poskytující prostředky k výpočtu charakteristik únosnosti a průhybu nosníků. Dobré výsledky podává v případě malých výchylek nosníků podrobených pouze bočnímu zatížení. Touto problematikou se zabýval již Leonardo da Vinci a také Galileo Galilei. Leonardo da Vinci však ještě neznal Hookův zákon a Galileo Galilei učinil některé nesprávné předpoklady. Teorie tak nese jména Leonharda Eulera a Daniela Bernoulliho, kteří tuto teorii formulovali kolem roku 1750 [14].

Základní tvar rovnice modelu je [13]

$$\rho_S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -ESK^2 \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}, \quad (12)$$

ale aplikačně výhodnější je upravený tvar [11]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\kappa^2 \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}, \quad (13)$$

kde hlavní parametr rovnice  $\kappa$  je určen vztahem [13]

$$\kappa = \sqrt{\frac{EK^2}{\rho L^4}}. \quad (14)$$

Symbol představují:  $u$  - amplituda výchylky, m;  $t$  - čas, s;  $x$  - umístění daného bodu v jednotkovém prostoru, -. Hlavní parametr rovnice  $\kappa$  je vypočten z konstant:  $\rho$  - hustota materiálu,  $\text{kg m}^{-3}$ ;  $S$  - plocha průřezu,  $\text{m}^2$ ;  $E$  - Youngův modul pružnosti v tahu daného materiálu, Pa;  $L$  - délka tyče, m (délka se v základním tvaru rovnice modelu nevyskytuje, zde má význam normování na jednotkovou délku). Parametr  $K$  je určen vztahem

$$K = \sqrt{\frac{I_z}{S}}, \quad (15)$$

kde  $I_z$  - moment setrvačnosti průřezu kolmém k ose  $z$ ,  $\text{kg m}^{-2}$ ;  $S$  - plocha průřezu,  $\text{m}^2$  [11], [13].

Pro různé typy průřezů tyče bude mít parametr  $K$  rozdílné hodnoty určované například vztahy [13]:

$$K = \frac{H}{\sqrt{12}} \quad (16)$$

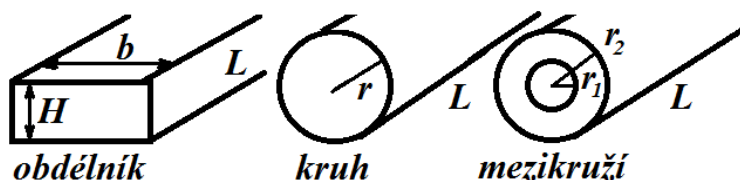
pro obdélníkový průřez tyče,

$$K = \frac{r}{2} \quad (17)$$

pro kruhový průřez tyče a

$$K = \frac{(\sqrt{r_1^2 + r_2^2})}{2} \quad (18)$$

pro dutou tyč kruhového průřezu, kde průřezem je mezikruží. Význam užitých parametrů viz obrázek 4..



Obrázek 4. Různé typy průřezů tyče (zdroj: vlastní)

Přestože je Euler-Bernoulliho model lepší než vlnová rovnice pro modelování vibrujících tyčí (jednorozměrných těles), je možné najít i mnoho dalších, komplexnějších modelů. Připomínám například omezení na lineární případy výchylek s malou amplitudou. Na druhou stranu ovšem podotýkám, že pro potřeby modelování tyčí hudebních nástrojů je to model pro začátek zcela dostatečný.

*Euler-Bernoulliho model tyče s proměnným průřezem* je mírnou modifikací předchozího modelu. Implementační požadavky jsou pouze poněkud rozšířeny. Pokud si přejeme modelovat tyč, jejíž hodnota výšky se mění v závislosti na vzdálenosti místa od začátku tyče, je potřeba mírně upravit vztah (12) do podoby,

ve které jsou plocha průřezu tyče a moment setrvačnosti průřezu tyče funkcí vzdálenosti každého z bodů od začátku tyče. Parametry tak přestávají být konstantou a stávají se funkcemi. Pro případ obdélníkového průřezu mají tvar [13]

$$S = bH_0\phi(x) \quad (19)$$

a

$$K^2 = bH_0^3\phi^3(x), \quad (20)$$

kde  $H_0$  - konkrétní tloušťka (výška) tyče, m;  $b$  - šířka tyče, m;  $\phi(x)$  - funkce, která říká, jak se tloušťka tyče mění v průběhu vzdálenosti každého z bodů od začátku tyče, -. Funkce  $\phi(x)$  je normována na maximální hodnotu jedna. Význam všech ostatních funkcí a konstant je shodný s výše uvedeným.

*Nelineární Euler-Bernoulliho model* je další z možných modifikací Euler-Bernoulliho modelu reprezentovaného vztahem (13). Jeho transformace do nelineární podoby se provádí doplněním uvedené rovnice na tvar [11]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\kappa^2 \frac{\partial^4 u}{\partial t^4} + \frac{\gamma_1^2}{2} \left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_{\mathbb{U}}^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (21)$$

kde

$$\gamma_1^2 = \frac{EL^2}{\rho}. \quad (22)$$

Význam symbolů je opět shodný s výše uvedeným.

*Kirchhoffův model tenkého plátu* vychází ze základů Kirchhoff-Loveovi teorie. Tato teorie představuje dvourozměrný matematický model vytvořený za účelem určení napětí a deformace v tenkých plátech (deskách), na které působí síly a momenty. Jde o rozšíření Euler-Bernoulliho teorie nosníků a formuloval ji Augustus Edward Hough Love v roce 1888 na základě předpokladů, které učinil Gustav Kirchhoff [15].

Rovnice modelu uniformního tenkého izotropického plátu má tvar [11]

$$\rho H \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -D \Delta \Delta u, \quad (23)$$

kde

$$D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (24)$$

Aplikačně výhodnější podoba rovnice (23) má tvar [11]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\kappa^2 \Delta \Delta u, \quad (25)$$

kde

$$\kappa^2 = \frac{D}{\rho H L^4}. \quad (26)$$



Význam jednotlivých parametrů je následující:  $\rho$  - hustota materiálu, ze kterého je plát vyroben,  $\text{kg m}^{-3}$ ;  $H$  - tloušťka plátu,  $\text{m}$ ;  $E$  - Youngův modul pružnosti v tahu daného materiálu,  $\text{Pa}$ ;  $\nu$  - Poissonovo číslo,  $-$ ;  $\kappa$  - hlavní parametr rovnice;  $L$  - geometrický průměr rozměrů délky a šířky,  $\text{m}$  (je zastoupen za účelem normování rovnice na jednotkovou plochu).

*Von Kármánův model tenkého plátu* je rozšířením výše uvedeného Kirchhoffova modelu tenkého plátu do nelineární soustavy dvou rovnic. Rovnice mají podobu [11]

$$\rho H \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -D \Delta \Delta u + \mathcal{L}(\Phi, u), \quad (27)$$

$$\Delta \Delta \Phi = -\frac{EH}{2} \mathcal{L}(u, u), \quad (28)$$

kde se k dříve uvedeným konstantám a funkcím přidává funkce  $\Phi$ , často nazývaná Airyho funkce napětí, a operátor  $\mathcal{L}(\cdot, \cdot)$  definovaný vztahem [11]

$$\mathcal{L}(\alpha, \beta) = \alpha_{xx}\beta_{yy} + \alpha_{yy}\beta_{xx} - 2\alpha_{xy}\beta_{xy}. \quad (29)$$

Airyho funkce napětí je speciálním případem Maxwellovy funkce napětí, ve které jsou přijaty jisté předpoklady a je tak vhodný pouze pro dvourozměrné případy [16].

Podobně jako u předchozích rovnic uvádím pro úplnost ještě mírně upravený tvar soustavy rovnic (27) a (28) výhodnější pro implementaci do programu [11]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\kappa^2 \Delta \Delta u + \kappa^2 \mathcal{L}(\Phi, u), \quad (30)$$

$$\Delta \Delta \Phi = -\mathcal{L}(u, u). \quad (31)$$

Uvedené rovnice (30) a (31) jsou normovány na výhodnější tvar pomocí vztahů [11]

$$\Phi_0 = D \quad (32)$$

a

$$u_0 = \frac{H}{\sqrt{6(1-\nu^2)}}, \quad (33)$$

přičemž normování samotné se provádí jednoduchým způsobem podle [11]

$$u = \frac{u'}{u_0} \quad (34)$$

a

$$\Phi = \frac{\Phi'}{\Phi_0}, \quad (35)$$

kde symboly s nulovým indexem mají význam normy a jsou uvedeny výše, symboly s čárkou představují nenormované funkce.

### 1.2.3. Výběr metody

Výhodou fyzikálního modelování je skutečnost, že k řešení jednoho problému je možné přistoupit několika různými způsoby. Metoda reprezentuje, jakým pohledem se díváme na rovnici představující model, a jak tuto rovnici hodláme řešit. S ohledem na nutnost řešení úlohy prostřednictvím výpočetní techniky v rámci aplikace se dále omezím pouze na numerické metody a modely. Každá z metod má své výhody a nevýhody a je tak více či méně vhodná k použití v různých případech. Dále je zmíněno několik základních možností a odůvodněn výběr konkrétní metody pro vlastní aplikaci.

První možností volby je využití *metody uvolňování (Lumped mass-spring network)*. Základem metody je úplné uvolnění všech těles (bodů tvořících těleso) a nahrazení vazeb vazbovými silami. Pro každé uvolněné těleso se napíše pohybová rovnice. Vznikne tak soustava pohybových rovnic, která se dále doplní o vazební rovnice, a řešením získané soustavy získáme výsledek, jímž jsou jak kinematické závislosti jednotlivých těles soustavy, tak i vazbové síly a momenty, anebo neznámé zatěžující silové a momentové účinky [17]. Systém si lze představit jako síť tvořenou vzájemně pospojovanými hmotnými body (uzly) pomocí pružin, na něž aplikujeme Newtonovy zákony. Uvedený způsob popisu částí hudebních nástrojů byl použit již na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let minulého století jako základ pro prostředí syntezátorů s názvem CORDIS a CORDIS-ANIMA [11].

Druhou možností je *modální syntéza*. Má dlouhou historii ve fyzikálním modelování a je založena na využití frekvenční domény, respektive na modálním popisu vibrací různých objektů. Vibrace objektu jako celku mohou být rozloženy do příspěvků od jednotlivých módů. Každý z módů přitom osciluje na jediné komplexní frekvenci. Časové průběhy jednotlivých módů jsou pak získány pomocí funkce sinus. I tento přístup byl již úspěšně využit například v softwarových balíčcích MOSAIC a Modalys určených k hudební syntéze [11].

Dalším zajímavým prostředkem, kterým je možné realizovat fyzikální modelování, jsou takzvané *digitální vlnovody (Digital waveguides)*. Základní myšlenka je prostá. Při uvažování pouze v jednorozměrném prostoru existuje možnost popsat pohyb média pomocí dvou pohybujiících se a vzájemně neinterreagujících vln. To je v praxi elegantně řešitelné pomocí dvousměrových zpožďovacích linek. Nejvýznamnějším přínosem metody je pak obrovské snížení výpočetní náročnosti celého algoritmu v porovnání s ostatními používanými metodami. K výpočtu jediného vzorku časového průběhu výsledného signálu je v případě některých metod fyzikálního modelování nutné provést stovky nebo dokonce i tisíce jednotlivých výpočtů. U digitálních vlnovodů odpadají v podstatě veškeré výpočty. Pro získání časového průběhu stačí pouze číst hodnoty uložené v paměťových registrech. I tato metoda má však své nedostatky. Tím základním je hlavně omezení na jednorozměrný prostor. Digitální vlnovody je tak možné úspěšně využít například při modelování strunných nebo dechových nástrojů, ale pro nástroje, u kterých nepřevládá jeden rozměr nad ostatními, je metoda naprosto nepoužitelná [11].

Konečně poslední zde zmíněnou možností je *metoda konečných diferencí (rozdílů) v časové oblasti*. V literatuře je běžněji označována anglickým pojmem *Finite Difference Time Domain* (dále také FDTD), proto bude dále v textu užíváno také toto označení. Pochází z numerických metod pro simulaci elektromagnetických polí. Podstata spočívá v nahrazení parciálních derivací diferencemi podle určitých pravidel. Metoda má již velmi dlouhou historii v oblasti aplikované matematiky a z počátku se využívala například pro simulaci dynamiky kapalin nebo právě pro řešení rozložení elektromagnetických polí. Z počátku se příliš o využití v hudební syntéze neuvažovalo. Hlavním důvodem je výpočetní náročnost metody [11].

Ve výše uvedeném stručném výčtu nejznámějších metod by bylo možné pokračovat například některými hybridními metodami, metodou konečných prvků (FEM - Finite Element Method) a dalšími. V zájmu stručnosti se však omezím pouze na uvedené čtyři nejpoužívanější metody fyzikálního modelování v oblasti syntézy hudebních nástrojů a odůvodním výběr jedné z metod pro praktické použití ve vlastní aplikaci.

Metoda uvolňování je jistě zajímavá, snadno představitelná a navíc umožňuje řešení situací s nelineárními kontaktními silami. Na druhou stranu byla úspěšně použita v praxi už asi před třiceti lety a od jejího využívání se upustilo ve prospěch metod dalších. Pro novou práci by bylo jistě vhodné využít něco poněkud modernějšího s větší budoucností. Modální syntéza má zase velmi blízko například k aditivní syntéze, která již byla prakticky vyzkoušena v předchozím projektu. Není zcela vhodná pro signály obsahující větší množství frekvencí ve spektru. Digitální vlnovody by byly ideální volbou pro potřeby modelování pouze jedno-rozměrných nástrojů (metalofon, xylofon). Dvourozměrné nástroje není možné touto metodou modelovat, což představuje značné omezení v případě perkusních nástrojů vzhledem k rozměrům například membranofonů. Nakonec zbývá metoda konečných diferencí v časové oblasti. Tato metoda se jeví jako zdaleka nejvhodnější. Jde o metodu poměrně starou, a tak je dostupné značné množství literatury, ze které se dá čerpat. Na druhou stranu se metoda FDTD využívá v oblasti syntézy hudebních nástrojů relativně krátce a přinejmenším v nejbližší budoucnosti bude jistě dále využívána. Navíc je metodu značně universální. Umožňuje řešení nelineárních rovnic a snadné rozšíření na využití u složitějších hudebních nástrojů. V aplikaci tedy bude využita metoda konečných diferencí v časové oblasti.

#### 1.2.4. Metoda konečných diferencí v časové oblasti

Metoda konečných diferencí v časové oblasti je podle výše uvedeného numerická metoda pro řešení parciálních diferenciálních rovnic (nebo jejich soustav), jejíž podstata spočívá v nahrazení parciálních derivací diferencemi podle určitých pravidel. Aproximujeme tedy derivace diferencemi, přičemž tuto aproximaci je možné provést několika způsoby, jak vidět na obrázku 5.. Získáme tak rov-

nici v diskrétní podobě, takzvaný *numerický model*. Dodávám, že existují i další možnosti aproximace derivací diferencemi.

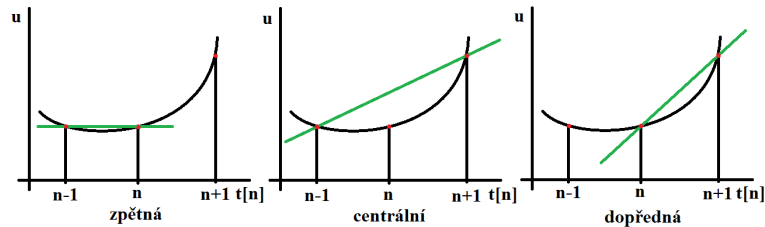
Vybrané tři způsoby převedení derivace na difference zachycené na obrázku 5. je možné vyjádřit pomocí matematického zápisu následujícími rovnicemi [11]:

$$\frac{d}{dt} \approx \delta_{t-} \triangleq \frac{1}{k} (1 - e_{t-}), \quad (36)$$

$$\frac{d}{dt} \approx \delta_t \triangleq \frac{1}{2k} (e_{t+} - e_{t-}), \quad (37)$$

$$\frac{d}{dt} \approx \delta_{t+} \triangleq \frac{1}{k} (e_{t+} - 1). \quad (38)$$

Význam užitých symbolů viz seznam použitých symbolů.



Obrázek 5. Ukázka způsobů aproximace první derivace pomocí diferencí v časové oblasti (zdroj: vlastní)

Jak je zřejmé z obrázku 5., pro každou z diferencí získáme jiný výsledek a tyto výsledky nejsou vždy stejně dobré. Na otázku, jak je který způsob přesný, odpovídá Taylorův rozvoj, který určuje především řád přesnosti jednotlivých aproximací. Obecně platí, čím vyšší řád, tím přesnější aproximace [11].

V prostorové oblasti se provádí aproximace derivací diferencemi obdobným způsobem, jako je tomu v časové oblasti.

Postup vhodný pro dodržení při aplikaci FDTD je možné shrnout následovně. Nejprve se určí vyhovující síť (množina uzlů), která musí být na uzavřené oblasti a okrajové podmínky na hranicích této oblasti musí být známy. Výběr množiny uzlů sítě musí následovat specifikování vzdáleností mezi uzly. Jednotlivé sousední uzly mohou mít stejnou vzdálenost, nebo se tato vzdálenost může měnit. Čím menší bude vzájemná vzdálenost uzlů sítě, tím přesnější výsledek obdržíme. Až v této chvíli je vhodné provést aproximace diferenciálních operátorů diferencemi, neboť je pro tento krok nezbytné znát vzdálenost sousedních uzlů aproximovaných těles (jak v prostorové, tak v časové oblasti). Nyní je již možné zapojit specifikaci okrajových podmínek a sestavit potřebné soustavy rovnic. V poslední části postupu již dochází k samotnému řešení obdržené soustavy rovnic, zpravidla iterativně pomocí výpočetního systému. Získaná řešení se vztahují pouze k dříve definovaným uzlům sítě.

*Numerická stabilita* je otázkou zcela zásadní u každé numerické metody a ani u FDTD tomu není jinak. Podmínka numerické stability se v případě zvolené metody zadává pomocí příslušné rovnice (nebo soustavou rovnic), jejímž řešením je nejmenší možná vzdálenost sousedních uzlů aproximujících těleso v prostorové oblasti. Tato vzdálenost může být větší (menší počet aproximačních uzlů), nikdy však menší (větší počet aproximačních uzlů).

Podmínku numerické stability je nutné stanovit pro každý konkrétní numerický model zvlášť. Lineární modely je možné analyzovat ve frekvenční oblasti (Von Neumannova analýza, využívá Laplaceovu a  $z$  transformaci), pro nelineární modely je ovšem nezbytné provést energetickou analýzu daného modelu. Způsob aproximace derivace diferencí má vliv nejen na přesnost, s jakou numerický model aproximuje analytický model, ale také zásadním způsobem ovlivňuje stabilitu celé rovnice.

*Normování* získaných diskrétních diferenčních rovnic je výhodné především pro zjednodušení vzorců a urychlení numerických výpočtů. Jednorozměrná tělesa se běžně normují na jednotkovou délku, dvourozměrná tělesa definovaná v kartézské souřadné soustavě na jednotkovou plochu a dvourozměrná tělesa v radiálních souřadnicích je výhodné normovat na jednotkový kruh.

Na téma metody konečných diferencí v časové oblasti i numerických metod všeobecně by bylo možné pokračovat velmi dlouho, tomuto oboru se věnuje značné množství knih i článků. V zájmu stručnosti se omezíme na výše uvedené nezbytné minimum a již pouze upozorníme na pojmy, které jsou pro uvedenou problematiku také významné, nicméně nejsou nezbytně nutné pro porozumění následnému textu. Jedná se o *numerickou disperzi* (způsobenou diskretizací spojitých veličin v čase a prostoru) a *konečnou přesnost* (číselsky zpracovatelných pomocí výpočetních systémů).

## 2. Výpočetní část aplikace

Praktická část práce spočívá v naprogramování aplikačního softwaru, jehož účelem je syntéza perkusních nástrojů pomocí virtuální akustické syntézy. Program využívá všechny výše popsané analytické modely převedené na modely numerické. Pro konverzi modelů do diskrétní podoby a jejich následné řešení je použita metoda konečných diferencí v časové oblasti.

Aplikaci byla napsána v programovacím jazyku Matlab. Program jako celek lze principiálně rozdělit do dvou hlavních částí. Tvoří je *výpočetní část*, zajišťující veškeré nutné výpočty pro vytváření zvuku pomocí fyzikálního modelování, a *grafické uživatelské rozhraní*, které slouží ke komunikaci uživatele s programem. Prakticky je program rozdělen do několika funkcí uložených v samostatných souborech. Grafické uživatelské rozhraní se nachází v souboru `spn.m` a zavoláním funkce `spn` z příkazového okna prostředí Matlab dojde ke spuštění aplikace. Zásadní význam mají také soubory obsahující kód funkcí realizujících syntézu podle konkrétních modelů:

- `we1d.m` (model 1D vlnové rovnice);
- `we2d.m` (model 2D vlnové rovnice v kartézské souřadné soustavě);
- `we2d_rad.m` (model 2D vlnové rovnice v radiální souřadné soustavě);
- `bar.m` (Euler-Bernoulliho model);
- `plate.m` (Kirchhoffův a Von Kármánův model tenkého plátu v kartézské souřadné soustavě);
- `plate_rad.m` (Kirchhoffův model tenkého plátu v radiální souřadné soustavě).

Ostatní funkce zapsané v samostatných souborech zabezpečují pomocné výpočty, správný chod grafického uživatelského rozhraní a komunikaci mezi grafickým uživatelským rozhraním a výše uvedenými funkcemi.

Ve výpočetní části programu probíhá samotná syntéza podle parametrů zadaných uživatelem přes grafické uživatelské rozhraní. Základním prvkem jsou jednotlivé numerické modely, získané diskretizací výše uvedených analytických modelů pomocí metody konečných diferencí v časové oblasti. V této části textu uvedu základní informace o konkrétních numerických modelech použitých v programu, zmíním některé další části programu nezbytné pro realizaci syntézy a naznačím, jakým způsobem syntéza probíhá.

Projekt byl vypracován na notebooku eMachines, model E525, procesor Intel(R) Celeron(R) CPU 900 @ 2.20 GHz, 3 GB RAM s operačním systémem Windows 7 Home Premium, 64 bitů. K této konfiguraci se vztahují odkazy na dobu výpočtu syntézy.

## 2.1. Numerické modely

Numerické modely jsou aproximací modelů analytických v diskrétní oblasti. V anglicky psané literatuře jsou též označovány pojmem značícím *schéma*. Vynecháme-li otázku lineárních a nelineárních numerických modelů, tak dělíme modely na dva základní typy:

- explicitní;

Pro získání řešení rovnice v časovém kroku  $n+1$  postačuje znát řešení rovnic v časových krocích  $n$  a  $n-1$ . Tyto rovnice je možné jednoduše přepsat do konkrétního programovacího jazyka ve své stávající podobě

- implicitní;

Vyžadují pro řešení rovnice v časovém kroku  $n+1$  kromě výsledků z kroků  $n$  a  $n-1$  také výsledek z kroku  $n+1$ , což představuje jistý problém. Řešení poskytuje přepis rovnice pomocí maticových operátorů. Maticový tvar je zpravidla nutný také pro nelineární rovnice, ovšem tento způsob je možný aplikovat i na explicitní numerické modely

*Explicitní numerický model* je nejjednodušším typem modelu. Rovnice modelu v diskrétní podobě je jednoduše přepsána do jazyku Matlab. Operace diskrétních derivací je ve většině případů možné provádět pro celé těleso najednou. Derivace v čase v diskrétní podobě se provádí rozepsáním rovnice pro jednotlivé časové kroky  $n$ . Následně se pak počítá s konkrétními "tvary tělesa", které těleso mělo, má, nebo bude mít v daném časovém okamžiku  $n$ . Způsob výpočtu je v podstatě stejný u jednorozměrných i dvourozměrných těles. Menší obtíž nastává pouze u rovnic v radiálních souřadnicích. Vzhledem k tomu, že prostorové diskrétní operace závisí na vzdálenosti konkrétního místa od středu tělesa, je nezbytné provádět výpočet zvlášť pro všechny uzly, které mají různou vzdálenost od středu.

Následující ukázka znázorňuje postup přepisu numerického modelu jednorozměrné vlnové rovnice bez útlumu do programového kódu v jazyku Matlab:

- 1) Numerický model [11]:

$$\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{xx}u. \quad (39)$$

- 2) Numerický model v rozepsané podobě:

$$\frac{1}{k^2} \left( u_l^{n+1} - 2u_l^n + u_l^{n-1} \right) = \gamma^2 \frac{1}{h^2} \left( u_{l+1}^n - 2u_l^n + u_{l-1}^n \right). \quad (40)$$

- 3) Vyjádření neznámé:

$$u_l^{n+1} = \frac{\gamma^2 k^2}{h^2} \left( u_{l+1}^n - 2u_l^n + u_{l-1}^n \right) + 2u_l^n - u_l^{n-1}. \quad (41)$$

4) Zápis v jazyku Matlab:

```
u(2:end-1) = ...  
+gamma^2*k^2/h^2*(u1(3:end)-2*u1(2:end-1)+u1(1:end-2))...  
+2*u1(2:end-1)-u2(2:end-1);
```

5) Zjednodušení a zavedení koeficientů pro snížení počtu výpočetních operací:

```
u(2:end-1) = ...  
+koef1*u1(2:end-1)+koef2*(u1(1:end-2)+u1(3:end))-u2(2:end-1);  
koef1 = 2*(1-(gamma*k/h)^2);  
koef2 = (gamma*k/h)^2;
```

Symbole `koef1` a `koef2` představují koeficienty, které jsou vypočítány před spuštěním opakovaného výpočtu na základě hlavního parametru rovnice a ostatních nezbytných údajů a jsou použity pro zvýšení rychlosti výpočtu. Symbol `u` zastupuje vektor, v němž jsou uloženy aktuální výchylky jednotlivých uzlů modelovaného tělesa, symboly `u1` a `u2` jsou tytéž vektory, ovšem v čase  $n-1$  respektive  $n-2$ . Do krajních bodů vektoru `u` jsou umístěny hodnoty virtuálních uzlů, jejich význam je osvětlen v části zabývající se okrajovými podmínkami. Význam ostatních symbolů viz seznam použitých symbolů.

Opakovaným výpočtem této rovnice a postupným obměňováním vektorů uložených v `u1` a `u2` (přesouváním do historie) je v podstatě řešen výpočet pohybu tělesa v čase. Časový krok  $k$  je převrácenou hodnotou vzorkovací frekvence, prostorový krok  $h$  je v tomto konkrétním případě dán vztahem [11]:

$$\eta = \frac{\gamma k}{h}, \quad (42)$$

kde hodnota konstanty  $\eta$  je určena například energetickou analýzou.

Z výše uvedeného je zřejmé, že nároky na výpočetní techniku nejsou nikterak velké. V paměti stačí uchovávat několik číselných koeficientů a dvě předchozí podoby tyče reprezentované symboly `u1` a `u2`. Dále je nutné rezervovat paměť pro aktuálně počítanou podobu `u`.

*Implicitní numerický model* vyžaduje řešení s využitím matic. Tyto matice představují jednotlivé operace (například derivace z prostorové oblasti, průměrování), které jsou nezbytné pro realizování daných numerických modelů. Diference v časové oblasti se provádí stejným způsobem, jako u explicitních rovnic. Pro objasnění opět následuje ukázka přepisování stejného explicitního numerického modelu jednorozměrné vlnové rovnice bez útlumu do programového kódu v jazyku



Matlab, který je uveden výše. První tři kroky jsou zcela shodné s předcházející ukázkou, pro větší přehlednost pokračujme krokem 3):

3) Vyjádření neznámé:

$$u_l^{n+1} = \frac{\gamma^2 k^2}{h^2} (u_{l+1}^n - 2u_l^n + u_{l-1}^n) + 2u_l^n - u_l^{n-1}. \quad (43)$$

4) Přepis pomocí matic:

$$\mathbf{u}^{n+1} = \frac{\gamma^2 k^2}{h^2} \mathbf{D}_{\mathbf{xx}} \mathbf{u}^n + 2\mathbf{u}^n - \mathbf{u}^{n-1}. \quad (44)$$

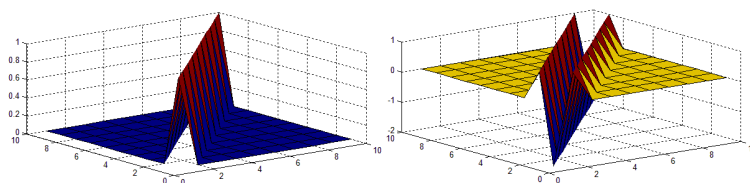
5) Zjednodušení zápisu:

$$\mathbf{u}^{n+1} = \left( \frac{\gamma^2 k^2}{h^2} \mathbf{D}_{\mathbf{xx}} + 2\mathbf{I} \right) \mathbf{u}^n - \mathbf{I} \mathbf{u}^{n-1}. \quad (45)$$

6) Zápis v jazyku Matlab po zavedení matic koeficientů:

```
u = A*u1 - B*u2;
```

V tomto tvaru je možné vyjádřit veškeré numerické modely o jedné rovnici. Význam matic koeficientů  $\mathbf{A}$  a  $\mathbf{B}$  je zřejmý z předchozí rovnice. Matice  $\mathbf{I}$  a  $\mathbf{D}_{\mathbf{xx}}$  představují matici identity a matici druhé diference v prostorové oblasti. Jejich příklad pro délku vektoru  $\mathbf{u}$  rovnu 10 (bodů, uzlů) je na následujícím obrázku 6.



Obrázek 6. Ukázka matice identity a matice druhé diskrétní derivace v prostorové oblasti (zdroj: vlastní)

Pokud má tedy vektor  $\mathbf{u}$  například rozměr  $1 \times 10$ , je z matematického hlediska nezbytné, aby rozměry matic koeficientů měly rozměry  $10 \times 10$ . U dvourozměrných těles reprezentovaných maticí je nejprve nutné matici "přeskládat" do vektoru a pak postupovat obdobným způsobem jako u těles jednorozměrných. Při dvourozměrné matici o rozměrech  $10 \times 10$  tak vzniká vektor o rozměru  $1 \times 100$  a rozměry příslušných matic koeficientů jsou pak již  $100 \times 100$ . Výpočetní výkon pro řešení rovnice je tedy požadován vyšší, než u explicitních numerických modelů. Požadavky na paměť jsou rovněž vyšší.

*Nelinearita* je do rovnic zanášena tím, že koeficienty rovnice se v průběhu času mění a jsou závislé na předchozích výsledných stavech rovnice. V každém cyklu

výpočtu je nejprve nutné vypočítat samotné koeficienty a až poté řešit danou rovnici nebo soustavu rovnic. Výpočet aktuálních koeficientů se provádí pomocí předem stanovených matic a předchozích výsledných stavů rovnice. Opět se tím navyšuje doba výpočtu a požadavek na paměť výpočetního systému (kromě matic koeficientů je nezbytné v paměti uchovávat i matice pomocné pro výpočet těchto matic).

*Soustavu rovnic* je možné řešit dvěma způsoby. Buď vypočítat nejprve první rovnici a výsledky použít pro řešení druhé rovnice, nebo řešit obě rovnice současně. Výběr způsobu řešení však není možné stanovit si samovolně, je určen konkrétními rovnicemi. Společné řešení obou rovnic je nezbytné v případě, že se obě vztahují ke stejnému časovému kroku. Provádí se tak, že z obou neznámých (reprezentovanými vektory) složí jeden vektor a odpovídajícím způsobem se musí upravit také matice koeficientů. Máme-li tedy dvourozměrnou matici  $10 \times 10$  pro každou z neznámých, jejich společný vektor má rozměr  $1 \times 200$  a matice koeficientů rozměr  $200 \times 200$ . Vliv na časové požadavky a paměť výpočetního systému je zřejmý, opět stoupají. Soustava rovnic navíc bývá v tomto případě zpravidla nelineární a je nutné v každém cyklu opakování provádět ještě výpočet matic koeficientů.

V několika předchozích odstavcích jsou několikrát zmíněny nároky na rychlost a paměť výpočetního systému. Pro ilustraci jsou doplněny i příklady rozměrů matic a vektorů. Cílem bylo upozornit na vysoké hardwarové požadavky, které případné využití fyzikálního modelování klade na výpočetní systém, a poodhalit jejich příčinu. Tento problém provází virtuální akustickou syntézu od jejího počátku a je stále aktuální (především u dvourozměrných a trojrozměrných těles). Přestože Matlab pracuje i s řídkými maticemi, výpočetní doba některých signálů může být velmi dlouhá. Uvedený problém bude ještě několikrát zmíněn v kapitole o grafickém uživatelském rozhraní a obsluze.

Otázka převodu analytických modelů na modely numerické a jejich následný převod do programovacího jazyku je rozsáhlá, výše uvedené ukázky jsou jedny z nejtriviálnějších. Jako úvod do problematiky jsou však dostatečné a postačující pro porozumění následujícího textu.

Níže uvedený přehled stručně shrnuje veškeré *numerické modely implementované do aplikace*. Všechny rovnice pochází z [11].

Jednorozměrné numerické modely definované v kartézské souřadné soustavě:

- Vlnová rovnice:

- Explicitní numerický model;
  - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{xx}u$
  - $\gamma$  - hlavní parametr
- Explicitní numerický model (matice);
  - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{xx}u$
  - $\gamma$  - hlavní parametr
- Implicitní numerický model (matice).
  - $(\theta + (1 - \theta)\mu_x)\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{xx}u$
  - $\gamma$  - hlavní parametr
  - $\theta$  - volný parametr

- Rovnice pro tuhé těleso:

- Explicitní numerický model;
  - Euler-Bernoulliho model tyče (základní podoba)
  - $\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u$
  - $\kappa$  - hlavní parametr
- Explicitní numerický model (matice);
  - Euler-Bernoulliho model tyče (základní podoba)
  - $\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u$
  - $\kappa$  - hlavní parametr
- Implicitní numerický model (matice);
  - Euler-Bernoulliho model tyče (základní podoba)
  - $(\theta + (1 - \theta)\mu_x)\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u$
  - $\kappa$  - hlavní parametr
  - $\theta$  - volný parametr
- Proměnný průřez (matice);
  - Euler-Bernoulliho model tyče s proměnným průřezem
  - $[\phi]\delta_{tt}u = -\kappa_0^2 \delta_{xx}(\phi^3 \delta_{xx}u)$
  - $[\phi] = (\mu_{xx} \phi^3) / \phi^2$
  - $\kappa_0$  - hlavní parametr, konkrétní podoba závisí na zvoleném průřezu
  - $\phi$  - funkce určující výšku tělesa
- Nelineární numerický model (matice).
  - Nelineární Euler-Bernoulliho model tyče (matice)
  - $\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u + \frac{\gamma_1^2}{2} \langle \delta_{x+u}, \mu_t \cdot \delta_{x+u} \rangle_{\mathbb{U}_N} \delta_{xx}u$
  - $\kappa$  - hlavní parametr
  - $\gamma_1^2 = EL^2 / \rho$  (v aplikaci je z praktických důvodů použito  $\gamma_1 = 5\,000 \kappa$ )

Dvourozměrné numerické modely definované v kartézské souřadné soustavě:

- Vlnová rovnice:
  - Explicitní numerický model;
    - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{\Delta \boxplus} u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
  - Explicitní numerický model (matice);
    - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{\Delta \boxplus} u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
  - Explicitní numerický model (parametr);
    - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \left( \alpha \delta_{\Delta \boxplus} u + (1 - \alpha) \delta_{\Delta \boxtimes} \right) u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
    - $\alpha$  - volný parametr, může omezovat numerickou disperzi
  - Implicitní numerický model (matice).
    - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \left( 1 + \frac{k^2(1-\theta)}{2} \delta_{tt} \right) \left( \alpha \delta_{\Delta \boxplus} u + (1 - \alpha) \delta_{\Delta \boxtimes} \right) u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
    - $\theta$  - volný parametr
    - $\alpha$  - volný parametr, může omezovat numerickou disperzi
- Rovnice pro tuhé těleso:
  - Explicitní numerický model;
    - Kirchhoffův model tenkého plátu
    - $\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{\Delta \boxplus, \Delta \boxplus} u$
    - $\kappa$  - hlavní parametr
  - Nelineární numerický model (matice).
    - Von Kármánův model tenkého plátu
    - $\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{\Delta \boxplus, \Delta \boxplus} u + \kappa^2 [\mathcal{L}(\Phi, u)]$
    - $\delta_{\Delta \boxplus, \Delta \boxplus} \Phi = -[\mathcal{L}(u, u)]$
    - $\kappa$  - hlavní parametr
    - $\Phi$  - Airyho funkce napětí

Dvourozměrné numerické modely definované v radiální souřadné soustavě:

- Vlnová rovnice:
  - Explicitní numerický model;
    - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{\Delta \circ} u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
  - Explicitní numerický model (matice);
    - $\delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{\Delta \circ} u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
  - Implicitní numerický model (matice).
    - $(1 + \gamma^2 k^2 \alpha \delta_{\Delta \circ}) \delta_{tt}u = \gamma^2 \delta_{\Delta \circ} u$
    - $\gamma$  - hlavní parametr
    - $k$  - časový krok
    - $\alpha$  - volný parametr, může omezovat numerickou disperzi
- Rovnice pro tuhé těleso:
  - Implicitní numerický model.
    - Kirchhoffův model tenkého plátu
    - $(1 + \alpha \kappa^2 k^2 \delta_{\Delta \circ, \Delta \circ}) \delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{\Delta \circ, \Delta \circ} u$
    - $\kappa$  - hlavní parametr
    - $k$  - časový krok
    - $\alpha$  - volný parametr, může omezovat numerickou disperzi

## 2.2. Okrajové podmínky

Nastavení okrajových podmínek fyzikálně odpovídá definování způsobu, jakým jsou uchyceny okraje vibrujícího tělesa. V matematické oblasti se ošetření okrajových podmínek provádí definováním hodnot, kterých mohou nabývat poslední uzly reprezentující modelované těleso. Kromě posledních uzlů reprezentujících těleso je v některých případech nutné definovat také takzvané virtuální, fiktivní uzly. Ty jsou jakýmsi myšleným prodloužením daného tělesa a jsou nutné pro realizaci výpočtu rovnice. Jejich nutnost vyplývá z faktu, že modely těles v sobě zahrnují diference v prostorové oblasti, a ze způsobu, jakým se tyto diference počítají. Okrajové podmínky mohou být energeticky konzervativní nebo ztrátové. Správné nastavení okrajových podmínek je velmi důležité pro zajištění numerické stability rovnice.

Existují tři základní možnosti nastavení hodnot okrajových a virtuálních uzlů vektoru nebo matice aproximujících těleso:

- pevně uchycený okraj (Dirichletova podmínka);  
Nulové hodnoty koncového i virtuálního uzlu (virtuálních uzlů u rovnice pro tuhé těleso)
- volný okraj (Neumannova podmínka);  
Hodnoty koncového uzlu se po výpočtu rovnice ponechají, hodnoty virtuálních uzlů se dopočítají podle příslušných rovnic
- podložený okraj;  
Hodnoty koncového uzlu se po výpočtu rovnice nastaví vždy na nulovou hodnotu, hodnoty virtuálních uzlů se dopočítají podle příslušných rovnic

Konkrétní provedení uvedených okrajových podmínek je závislé na typu okrajových podmínek nastavených uživatelem a na výsledcích energetické analýzy dané rovnice, která stanovuje přesné vztahy pro okrajové podmínky.

Pro úplnost ještě dodejme, co přesně znamenají krajní uzly tělesa. U jednorozměrných těles, například u tyče, se jedná prostě o začátek a konec tyče. Pro dvourozměrná tělesa jsou to pak samozřejmě uzly ohraničující plochu tělesa a trochu překvapivě, u těles definovaných v radiální souřadné soustavě, také střed tělesa a jeho okolí.

*Uchycení tělesa* se provádí velmi jednoduchým způsobem. Každému uzlu tělesa, ve kterém má být těleso uchyceno, je po každém opakovaném výpočtu nastavena nulová hodnota. Tím je v podstatě omezen jakýkoliv pohyb tělesa v tomto uzlu, čímž je těleso "uchyceno". V programu je nutné provést nejprve uchycení a až následně vypočítat a provést okrajové podmínky. Pro provedení uchycení a nastavení okrajových podmínek je po každém výpočtu hlavní rovnice v cyklu volána samostatná funkce `proved_uchyceni_a_okrajove_podminky`.

Jak bylo uvedeno výše, matice reprezentující dvourozměrná tělesa se pro potřeby výpočtu "přeskládávají" do vektorů. Okrajové podmínky a uchycení jsou ale lépe aplikovatelné na maticovou podobu. To je jedním z důvodů, proč se vektory dvourozměrných těles opět převádí do maticového tvaru. Dalšími důvody jsou například snímání výstupního signálu a vykreslování průběhu syntézy. V některých případech je možné implementovat okrajové podmínky i uchycení přímo do matic koeficientů. Tento způsob je jistě na jednu stranu výpočetně rychlejší, na druhou stranu se mi ale jeví jako neprůhledný a nepříliš flexibilní. Pro každou podmínku je nutné vytvořit a používat jinou matici, navíc zrychlení výpočtu není nikterak závratné. Z těchto důvodů uvedené možnosti nejsou v programu nevyužity.

## 2.3. Buzení

Máme-li vybraný model hudebního tělesa v podobě numerického modelu, můžeme se zabývat otázkou, jakým způsobem rovnicí vybudit, neboli jakým způsobem rozpohybovat těleso nástroje. V reálném světě tedy odpovídáme na otázky kam do tělesa udeřit, jak velkou rychlostí, jaký tvar má mít předmět, kterým do tělesa udeříme atd. Po matematické stránce to v zásadě odpovídá nastavení počátečních podmínek diferenciálních rovnic. Do programu jsem implementoval dva různé způsoby buzení. Těleso je možné rozezvuchit jednoduchým budícím impulsem nebo pomocí nelineárního buzení.

*Budící impuls* je poměrně jednoduchý způsob, v podstatě odpovídá nastavení počátečních podmínek rovnice před spuštěním cyklického výpočtu. Budící impuls je modelován v samostatné funkci `vypocitej_budici_impuls`, ve které se na základě parametrů zadaných uživatelem vygeneruje odpovídající tvar tělesa. Konkrétní podoba impulsu je závislá na rozměru tělesa, souřadné soustavě, ve kterých je těleso modelováno (kartézská souřadná soustava nebo radiální souřadná soustava), a zadaných parametrech. Menší komplikace mohou být způsobeny převodem mezi kartézskou soustavou souřadnic a radiální soustavou souřadnic.

Do průběhu syntézy je vygenerovaný impuls zaveden následovně. Počáteční tvar modelovaného tělesa v časovém kroku  $n=1$  je nastaven do klidové polohy (vektor nebo matice reprezentující těleso má výchylky všech uzlů nastaveny na nulovou hodnotu). Tvar tělesa v časovém kroku  $n=2$  odpovídá právě budícímu impulsu. Opakovaný výpočet pak začíná krokem  $n=3$ .

O jednotlivých parametrech budícího impulsu je širěji pojednáno v kapitole zabývající se uživatelským rozhraním. Konkrétní hodnoty nejsou pro vysvětlení principu výpočtu syntézy relevantní.

*Nelineární buzení* je naopak dosti sofistikovaný způsob buzení a umožňuje simulovat interakci mezi tělesem nástroje a paličkou nebo jiným předmětem, kterým do nástroje udeříme.

První část postupu je zcela shodná s buzením pomocí budícího impulsu. Opět je volána funkce `vypocitej_budici_impuls` a uživatel má naprosto shodné možnosti nastavení. Takto vzniklý tvar budícího impulsu však není použit přímo pro počáteční vychýlení modelovaného tělesa, to je prozatím ponecháno v klidu. Před započítáním cyklického počítání rovnice je nejprve nutné určit pohyb (pomocí vychýlení  $uH2$  a  $uH1$  v časových okamžicích  $n=1$  respektive  $n=2$ ) a tzv. frekvenční parametr paličky ( $wH$ ). Dále pak poměr hmotností paličky a modelovaného tuhého tělesa nebo membrány ( $MM$ ). Konkrétní hodnoty se určí v kódu programu vztahy [11],[18]:

```
uH2 = 0;  
uH1 = k*v0;  
wH = wH=(KH/MH)^(1/(alfa+1));  
a
```

$$MM = MH/M;$$

pro tuhé těleso nebo

$$MM = MH/(RoA * A)$$

pro membránu.

Význam symbolů je následující:  $k$  - časový krok syntézy, s;  $v_0$  - počáteční rychlost pohybu paličky,  $m s^{-1}$ ;  $MH$  - hmotnost paličky, kg;  $KH$  - tuhost paličky,  $N m^{-alfa}$ ;  $M$  - hmotnost tělesa, kg;  $RoA$  - plošná hustota membrány,  $kg m^{-2}$ ;  $A$  - plocha membrány,  $m^2$ ;  $alfa$  - parametr nelinearity,  $-$ .

V každém cyklu je před započítáním výpočtu rovnice nejprve nutné určit, zdali je ještě palička v kontaktu s tělesem hudebního nástroje. Pokud ano, vypočítá se síla, kterou právě palička působící na nástroj a dále nová velikost výchylky paličky. Výpočet rovnice pak následuje úprava výsledku výpočtu, což se provede přičtením tvaru dříve vypočteného budícího impulsu, jehož velikost je ovlivněna poměrem hmotností paličky a tělesa a aktuálně působící silou. Pro potřeby dalšího cyklu je nutné uchovat velikost aktuální ( $uH$ ) a předešlé ( $uH1$ ) výchylky paličky. Jejich význam spočívá v tom, že pomáhají určit novou aktuální výchylku paličky v novém cyklu tím, že umožňují vypočítat druhou derivaci uražené dráhy paličky. Druhá derivace dráhy podle času představuje zrychlení paličky, a pokud připojíme hmotnost paličky, získáme vztah mezi silou, kterou palička působí na těleso nástroje, a třemi hodnotami výchylek. Protože velikost síly jsme schopni zjistit na základě parametrů  $wH$  a  $alfa$  a předchozích výchylek tělesa a paličky, slouží naznačená souvislost pro zjištění nové aktuální výchylky paličky. Vše se nyní může opakovat.

## 2.4. Útlum

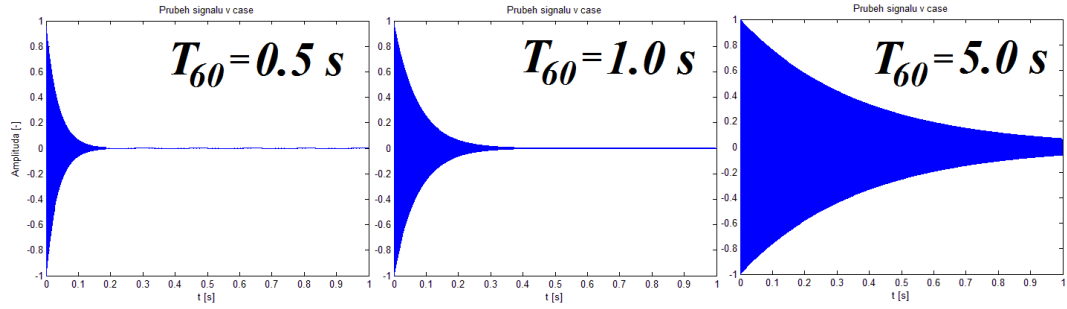
Jednotlivé rovnice, které se používají jako modely těles, jsou zpravidla nejprve odvozeny v bezeztrátové podobě. Pokud bychom použili takovouto rovnici, výsledný akustický signál by měl v celé své délce stejnou celkovou hlasitost. To jistě neodpovídá našim zkušenostem z reálného života. V praxi je každý zvuk vydávaný kmitáním tělesa utlumován a jeho amplitudová obálka je popsitelná exponenciálou.

Abychom byli schopní napodobit tento pokles hlasitosti výsledného zvuku, je nutné základní rovnice modelů doplnit o další prvky, které se při řešení rovnice postarají o požadovaný efekt. Nejjednodušším způsobem, jak utlumit vibrace numerického modelu, je doplnit rovnici o prvek představující časovou derivaci násobenou konstantou běžně označovanou symbolem  $\sigma_0$  - frekvenčně nezávislý parametr útlumu,  $s^{-1}$ . Vhodně zvolenou hodnotou konstanty  $\sigma_0$  je možné nastavit jakýkoliv požadovaný útlum signálu jako celku. Pro pohodlnější práci je navíc výhodné definovat velikost konstanty pomocí vztahu [11]

$$\sigma_0 = \frac{6 \ln(10)}{T_{60}}, \quad (46)$$



kde  $T_{60}$  - čas, za který má signál poklesnout o 60 dB, s. Parametr je často označován pojmem *doba dozvuku*. Ukázka typické exponenciální poklesu hlasitosti je na obrázku 7., kde délka signálu je vždy 1 s, doba dozvuku se mění. Hodnoty doby dozvuku jsou: 0.5 s, 1.0 s a 5.0 s. Amplituda je normována na jednotkovou úroveň.



Obrázek 7. Exponenciála poklesu hlasitosti, délka signálu 1 s, doba dozvuku: 0.5 s, 1.0 s, 5.0 s (zdroj: vlastní)

Uvedený postup je opravdu velmi jednoduchý, čemuž však také odpovídají dosažené výsledky. Naštěstí existují i další možnosti. Již přidáním jednoho dalšího koeficientu je možné řídit útlum v závislosti na frekvenci. Útlum bude funkcí frekvencí obsažených v signálu. Do rovnice modelu je nutné vhodným způsobem implementovat koeficienty  $\sigma_0$  a  $\sigma_1$ , jejichž hodnoty jsou určeny vztahy [11]:

$$\sigma_0 = \frac{6 \ln(10)}{\xi(\omega_2) - \xi(\omega_1)} \left( \frac{\xi(\omega_2)}{T_{60}(\omega_1)} - \frac{\xi(\omega_1)}{T_{60}(\omega_2)} \right) \quad (47)$$

a

$$\sigma_1 = \frac{6 \ln(10)}{\xi(\omega_2) - \xi(\omega_1)} \left( -\frac{1}{T_{60}(\omega_1)} + \frac{1}{T_{60}(\omega_2)} \right), \quad (48)$$

kde platí

$$\xi(\omega) \triangleq \frac{-\gamma^2 + \sqrt{\gamma^4 + 4\kappa^2\omega^2}}{2\kappa^2}. \quad (49)$$

Parametr  $\sigma_0$  je v souladu s předchozím případem útlumu amplitudové obálky nazýván frekvenčně nezávislý parametr útlumu,  $s^{-1}$ ;  $\sigma_1$  - frekvenčně závislý parametr útlumu,  $s^{-1}$ . Pro uživatele je však praktičtější zadávat přímo hodnoty parametrů  $\omega_1$  - frekvence, na níž je požadována ovladatelná doba dozvuku, Hz;  $\omega_2$  - druhá frekvence, na níž je požadována ovladatelná doba dozvuku, Hz;  $T_{60}(\omega_1)$  - doba dozvuku na frekvenci  $\omega_1$ , s;  $T_{60}(\omega_2)$  - doba dozvuku na frekvenci  $\omega_2$ , s.

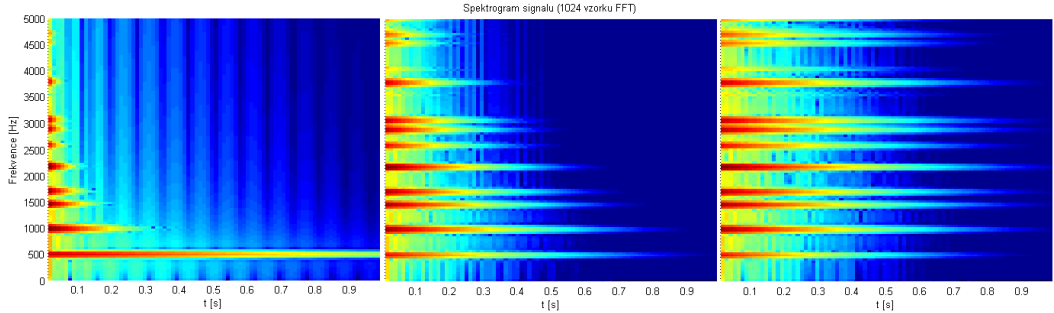
Při zadávání hodnot však musí být dodrženy dvě zásady [11]:

1) 
$$T_{60}(\omega_2) \leq T_{60}(\omega_1), \quad (50)$$

2) 
$$\omega_2 > \omega_1. \quad (51)$$

Konstanty  $\gamma$  a  $\kappa$  odpovídají výše popsaným hlavním parametrům konkrétních rovnic. V rovnicích, ve kterých se  $\gamma$  nevyskytuje, je její hodnota nulová. Pro rovnice, ve kterých se nevyskytuje  $\kappa$ , není možné použít frekvenčně závislý útlum. Vztahy (47),(48) a (49) jsou implementovány do programu, zde jsou uvedeny pouze pro úplnost.

Na následujícím obrázku 8. je ukázka spektrogramů stejného signálu, liší se nastavení hodnoty parametru  $T_{60}(\omega_2)$ . Pro první spektrogram  $T_{60}(\omega_2) = 0.1$  s, druhý  $T_{60}(\omega_2) = 0.5$  s a třetí  $T_{60}(\omega_2) = 1.0$  s. Hodnoty ostatních parametrů:  $T_{60}(\omega_1) = 1.0$  s;  $\omega_1 = 500$  Hz;  $\omega_1 = 3\,000$  Hz; Délka signálu je vždy 1 s; ostatní parametry nejsou nyní relevantní. Zobrazené frekvence jsou v rozsahu od 0 do 5 000 Hz. Podrobněji se nastavení všech parametrů věnuje podkapitola v části práce zaměřené na grafické uživatelské rozhraní a obsluhu aplikace.



Obrázek 8. Ukázka změny spektrogramu signálu v závislosti na změně hodnoty parametru  $T_{60}(\omega_2)$ , hodnoty jsou: 0.1 s, 0.5 s, 1.0 s (zdroj: vlastní)

Pro názornost si ukažme příklad rozšíření numerického Euler-Bernoulliho modelu o oba způsoby útlumu.

1) Bez útlumu [11]:

$$\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u. \quad (52)$$

2) Útlum amplitudové obálky:

$$\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u - 2\sigma_0 \delta_t u. \quad (53)$$

3) Frekvenčně závislý útlum:

$$\delta_{tt}u = -\kappa^2 \delta_{xxxx}u - 2\sigma_0 \delta_t u + 2\sigma_1 \delta_{t.xx}u. \quad (54)$$

V programu probíhá cyklus výpočtu ve všech případech naprosto stejným způsobem, výběr požadované rovnice je realizován příkazem (programovým přepínačem) `switch`.

## 2.5. Rozšíření

Kromě všech výše uvedených úprav numerických modelů je možné provádět i další vylepšení konkrétních modelů. Ve svém programu jsem se rozhodl tyto možnosti demonstrovat rozšířením Euler-Bernoulliho modelu tyče o verzi s proměnným průřezem a simulací připojení dutiny k membráně. Rozšíření modelu tyče o proměnný průřez již bylo popsáno u analytických modelů, neboť tato úprava ovlivňuje základní model značným způsobem. Oproti tomu modelování připojení dutiny je pouze mírným rozšířením základního modelu dvourozměrné vlnové rovnice představující membránu, a proto bude uvedeno zvlášť. Nejvhodnějším způsobem *modelování dutiny* (rezonátoru) by jistě bylo pomocí trojrozměrného tělesa. Vzhledem k nárokům kladeným na výpočetní systém pouhými dvourozměrnými tělesy jsem se rozhodl od tohoto způsobu modelování dutiny upustit a použít méně náročný způsob. Do rovnic jsem implementoval jejich rozšíření, jehož princip vystihuje vzorec [11]

$$u_{tt} = \gamma^2 \Delta u - \gamma^2 d^2 \int_0^1 \int_0^1 u \, dx \, dy \quad \text{pro } (x, y) \in \mathbb{U}^2, \quad (55)$$

kde je rozšíření rovnice aplikováno na dvourozměrnou vlnovou rovnici. Přitom platí:

$$\gamma = \frac{c_M}{L}, \quad (56)$$

a

$$d^2 = \frac{\rho c_0^2 L^4}{T_0 V_0}, \quad (57)$$

přičemž:  $c_M$  - vlnová rychlost v materiálu membrány, m s<sup>-1</sup>;  $L$  - jeden rozměr membrány, m;  $\rho$  - hustota výplně dutiny kg m<sup>-2</sup>;  $c_0$  - vlnová rychlost ve výplni dutiny, m s<sup>-1</sup>;  $T_0$  - napnutí membrány na jednotkovou délku, N m<sup>-1</sup>;  $V_0$  - objem dutiny, m<sup>3</sup>. Uvedený vztah platí pro dvourozměrnou membránu o rozměru  $LxL$ . Integrace ve vzorci (55) je v kódu programu nahrazena pomocí sumací.

Při úderu do membrány se zmenší simulovaný objem dutiny (jejím prohnutím) a vzroste tlak uvnitř dutiny. Membrána se snaží tento jev kompenzovat a zvětšit objem dutiny vlastním vychýlením opačným směrem v jiných místech.

## 2.6. Snímání výstupního signálu

Pokud již existuje pohybující se těleso (kmitající rovnici), posledním úkolem syntézy je ze systému získat akustický signál. Prakticky nejjednodušším a nejčastěji používaným způsobem je následující postup. Z celé délky (plochy,

objemu) tělesa se vybere jeden nebo více uzlů a v průběhu syntézy se zaznamenávají výchylky vybraného uzlu. Zaznamenané hodnoty pak spolu s časovým krokem snímání tvoří výsledný časový průběh signálu, který představuje (po normování velikosti výchylek na přijatelné hodnoty) akustický signál generovaný chvěním modelovaného tělesa. Výběr více uzlů poskytuje hladší průběh výsledného signálu, nicméně při pokusech se nepodařilo prokázat významnější rozdíly v akustickém signálu, proto jsem využil pouze základní (výpočetně méně náročné) provedení s jedním uzlem.

## 2.7. Vykreslování a stav

Pro vykreslování průběhu syntézy jsem napsal jednoduchou, avšak velmi užitečnou funkci `vykresli_prubeh`. Pokud je toto vykreslování uživatelem požadováno, v každém cyklu výpočtu je funkce zavolána a do samostatného okna se vykreslí buď aktuální výchylky všech uzlů aproximujících těleso (aktuální poloha tělesa), záznam dosavadních výchylek uzlu zvoleného pro snímání výstupního signálu, případně obojí. K vykreslování je využita standardní funkce Matlabu `surf`.

Stav průběhu syntézy je indikován ve spodní části grafického rozhraní v panelu Komentář a pomocí tzv. `waitbar`, což je standardní dialogové okno Matlabu, ve kterém je pomocí narůstající červené čáry naznačeno, kolik procent výstupního signálu je již syntézou vypočteno. Kromě toho je v dialogovém okně ještě tlačítko, jehož stisknutím je možné syntézu přerušit.

## 2.8. Průběh syntézy

Celý průběh syntézy je možné v obecné podobě zachytit formou vývojového diagramu. Pro tyto účely jsem vypracoval dva vývojové diagramy. První je na obrázku 9. a představuje nejzákladnější podobu průběhu syntézy. Obrázek 10. pak zobrazuje rozšířenou podobu vývojového diagramu syntézy. Oba vývojové diagramy byly zpracovány v programu Diagram Designer, verze 1.26 z roku 2013, značky by měly odpovídat příslušným normám, barvy byly doplněny pro lepší čitelnost. Přehled významu jednotlivých značek viz příloha, obrázek 37..

*Základní vývojový diagram průběhu syntézy* je zachycen na obrázku 9.. Ještě jednou podotýkám, že se nejedná o přesný diagram konkrétního programu, nýbrž o principiální naznačení průběhu syntézy. V tomto případě je naznačen pouze nejjednodušší možný postup. Podívejme se nyní na jednotlivé bloky blížeji:

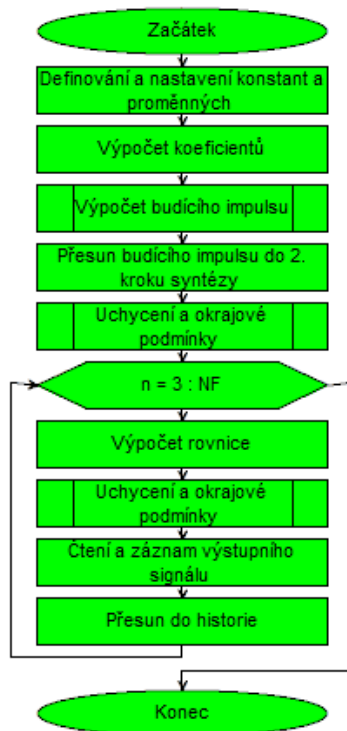
- **Začátek;**  
Reprezentuje spuštění funkce pro konkrétní model v aplikaci
- **Definování a nastavení konstant a proměnných;**  
Na základě vstupních parametrů funkce se nastavují všechny nezbytné konstanty a definují se nové proměnné, čímž dojde k alokaci paměti pro tyto

proměnné. Z nejdůležitějších konstant jmenujme například  $k$  (časový krok, je převrácenou hodnotou vzorkovací frekvence) a  $h$  (prostorový krok, udává vzdálenost dvou sousedních uzlů aproximujících těleso v kartézské souřadné soustavě). Nejvýznamnější proměnnou je  $u$ , do které se v každém cyklu výpočtu ukládá nová poloha tělesa, a  $out$ , jenž slouží k postupnému ukládání výchylky vybraného uzlu a který tak představuje výstupní signál

- Výpočet budícího impulsu;  
Proces probíhá v samostatné oddělené části programu, ve funkci `vypocitej_budici_impuls` zmíněné výše
- Přesun budícího impulsu do 2. kroku syntézy;  
Provádí se pouze v případě lineárního typu buzení a je tak nastaven počáteční stav rovnice. Nelineární způsob buzení zde není zachycen, tomuto způsobu buzení je věnován prostor v rozšířeném vývojovém diagramu
- Uchycení a okrajové podmínky;  
Proces probíhá v samostatné oddělené části programu, ve funkci `proved_uchyceni_a_okrajove_podminky`, o níž je krátce pojednáno výše. Tato funkce musí být spuštěna před začátkem cyklu a pak v každém průběhu cyklu výpočtu syntézy
- Hlavní cyklus;  
Probíhá od hodnoty  $n=3$  do hodnoty  $n=NF$ , která je výsledkem násobení vzorkovací frekvence s délkou signálu v sekundách. Pro  $n=1$  jsou všechny výchylky tělesa nastaveny na nulovou (klidovou) hodnotu, pro  $n=2$  má pak v tomto případě těleso tvar budícího impulsu
- Výpočet rovnice;  
V těle cyklu jsou zapsány všechny rovnice konkrétních numerických modelů a rovněž jejich varianty uzpůsobené zvolenému útlumu. Výběr správné rovnice se provádí pomocí příkazu `switch`
- Snímání a záznam výstupního signálu;  
Probíhá odečtením hodnoty výchylky na daném indexu (indexech  $u$  2D tělesa) a zapsáním získané hodnoty do příslušného místa proměnné `out`
- Přesun do historie;  
Aktuálně vypočtený tvar tělesa (proměnná  $u$ ) se přesune do proměnné představující tvar tělesa v předchozím kroku ( $u1$ ) a ten se přesune do proměnné reprezentující tvar tělesa před dvěma kroky ( $u2$ )

- Konec.

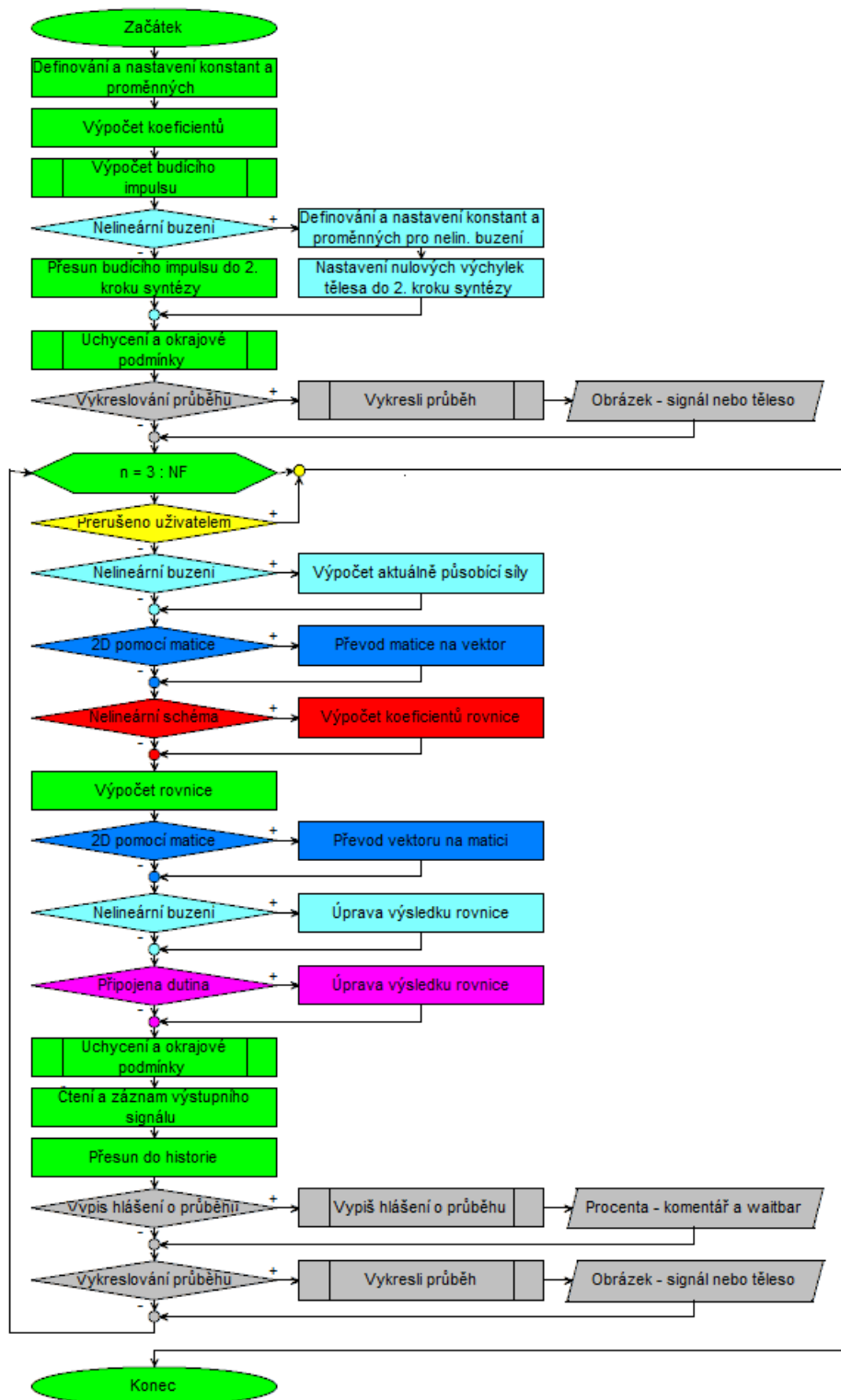
Ukončení cyklického výpočtu a odeslání výsledků syntézy do nadřazené funkce



Obrázek 9. Základní vývojový diagram průběhu syntézy (zdroj: vlastní)

*Rozšířený vývojový diagram průběhu syntézy* je na obrázku 10.. Zachycuje většinu možných scénářů, podle kterých může aplikace generovat akustický signál. Zelené bloky odpovídají zcela přesně těm uvedeným v předchozím diagramu. Modrozelené (tyrkysové) bloky se vztahují k nelineárnímu způsobu buzení rovnice, žlutý blok je závislý na vstupu od uživatele (uživatel může přerušit cyklus pomocí tlačítka "Cancel" na dialogovém okně `waitbar`), modré bloky představují převod matice proměnné  $u$  do vektoru a zpět v případě numerických modelů dvourozměrných těles řešených pomocí matic (z důvodu provedení uchycení a okrajových podmínek, snímání výstupu a případnému vykreslování), červené bloky souvisejí s nelineárními modely (nelinearita modelů je dána změnou koeficientů v každém cyklu, koeficienty závisí na předchozích polohách tělesa), fialové bloky řeší připojení dutiny k membráně a šedé bloky se vztahují k informování uživatele, pro syntézu samotnou nemají žádný význam. V rámci aplikace jsou pro uživatele ovšem velmi důležité.

Vývojové diagramy zachycují pouze výpočetní část průběhu syntézy. Nepokrývají problematiku fungování grafického rozhraní ani předávání dat mezi grafickou a výpočetní částí aplikace.



Obrázek 10. Rozšířený vývojový diagram průběhu syntézy (zdroj: vlastní)

### 3. Grafické uživatelské rozhraní aplikace

*Grafické uživatelské rozhraní* (dále také GUI z běžně užívaného anglického "Graphical User Interface") slouží k provádění veškerých úkonů souvisejících se syntézou perkusních nástrojů v rámci předložené aplikace. Vzhledem ke značnému množství ovládacích prvků je v následující části textu nejprve uveden popis těchto prvků a jejich vliv na výsledný signál, dále pak následuje krátký návod na nastavní syntézy a praktické rady pro zacházení s aplikací.

Rozhraní bylo vytvořeno standardním způsobem v programovacím prostředí Matlab za použití vestavěného grafického editoru spustitelného příkazem `guide`. Práce v tomto editoru je poměrně snadná, ovšem Matlab nepodporuje celou řadu funkcí, které by byly potřebné pro vytvoření opravdu pěkného, graficky i funkčně propracovaného grafického rozhraní pro vlastní aplikaci, čímž je myšleno například možnost určit layout, přidat stavový řádek a podobně.

Pro práci na GUI bylo použito PC s monitorem o poměru stran 16:9 a rozlišením 1366:768. Těmto parametrům je tedy GUI aplikace přizpůsobeno. Matlab bohužel nepodporuje ve svém grafickém editoru pro tvorbu GUI řadu funkcí, které by usnadnily přizpůsobování GUI různým typům monitorů, a programové zabezpečení těchto funkcí by bylo velmi pracné a pro aplikaci jako takovou nepřínosné. Celé GUI má tedy nastavenou konstantní velikost okna a všech svých prvků. V dnešní době se však již nepředpokládá přílišný výskyt monitorů s poměrem stran 4:3 nebo s výrazně menším rozlišením, než bylo používáno při tvorbě. Na většině PC by tedy neměl být problém se zobrazením GUI aplikace.

Po spuštění aplikace je samozřejmě stále viditelné okno Matlabu. Do jeho příkazového okna jsou vypisovány některé komentáře a případné chybové hlásky (vlastní i standardní).

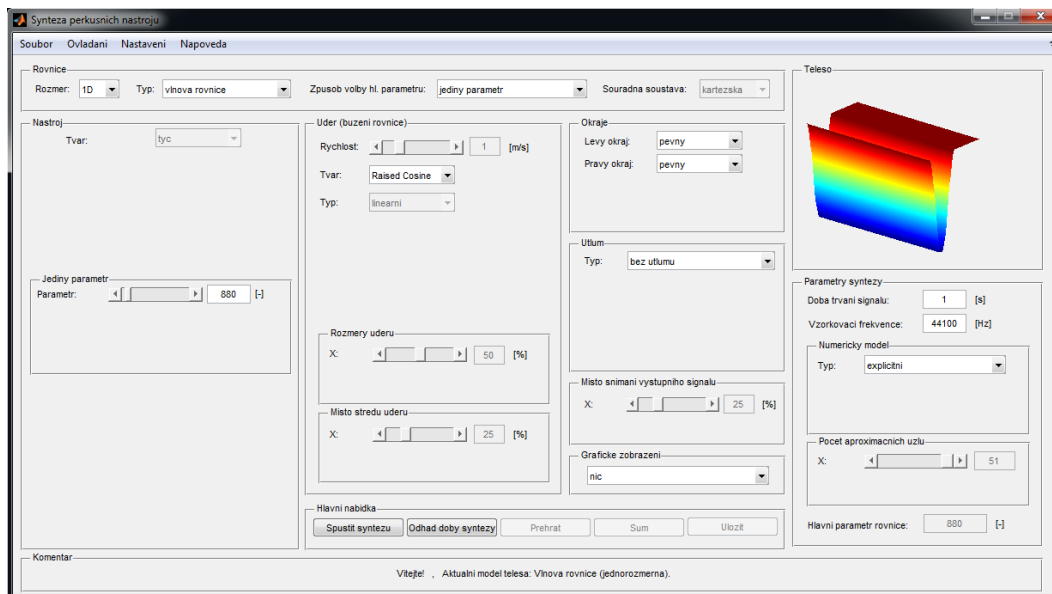
Aplikace se spouští příkazem `spn` v příkazovém okně prostředí Matlab, počáteční stav okna aplikace je na obrázku 11..

#### 3.1. Popis

*Grafické uživatelské rozhraní je uspořádáno* do několika logických celků, jejichž obsahy spolu určitým způsobem souvisí. Uveďme si nejprve krátký přehled a v dalších podkapitolách se věnujme jednotlivým oddílům samostatně. V horní části je šedá lišta menu, která je standardním prvkem běžných aplikací. Ostatní oddíly jsou od sebe graficky odděleny pomocí rámečků, takzvaných panelů. Každý rámeček má ve svém levém horním rohu stručný popisek, který naznačuje, čeho se týká.

Některé panely obsahují ještě vlastní podpanely. Ty slouží k dalšímu logickému dělení většího počtu parametrů v rámci panelů. Uvědomuji si, že tento způsob není zcela ve shodě se všeobecnými pravidly pro návrh grafických rozhraní. K tomuto způsobu dělení jsem přistoupil především kvůli již zmíněným omezením možnostem při návrhu grafických rozhraní pro prostředí Matlab.





Obrázek 11. Úvodní okno aplikace (zdroj: vlastní)

Veškerý text obsažený v aplikaci je v českém jazyce bez diakritiky (pro zajištění spolehlivé funkce).

Jednotky, ve kterých jsou hodnoty v grafickém uživatelském rozhraní zadávány, nejsou jednotkami základními, což má přiblížit nastavování reálným hodnotám (například tloušťka membrány je zadávána v jednotkách milimetrů namísto v jednotkách metrů).

Grafické rozhraní obsahuje následující panely (rámečky, logické celky): Rovnice, Nástroj, Úder (buzení rovnice), Okraje / Okraj a střed / Okraje a uchycení, Útlum, Místo snímání výstupního signálu, Grafické zobrazení, Obrázek, Parametry syntézy, Hlavní nabídka a Komentář.

Panely jsou naplněny jednotlivými prvky, jako jsou pop-up okna, posuvníky a editovací okna. Všechny posuvníky jsou doplněny svým vlastním editovacím oknem, z nichž některé jsou neaktivní a slouží pouze pro vypisování hodnoty nastavené posuvníkem, u ostatních je editovací okno aktivní a je možné zadat přímo číselnou hodnotu parametru. Nachází-li se zadaná hodnota v doporučeném rozmezí určeném posuvníkem, jezdec posuvníku se přenastaví do právě zadané hodnoty. Pokud je hodnota zadaná do editovacího okna mimo doporučený rozsah, posuvník zmizí, čímž indikuje hodnotu mimo doporučený rozsah.

Před zahájením popisu jednotlivých částí grafického uživatelského rozhraní se ještě zastavme u pomocného panelu *Komentář*. Je umístěn zcela vespod a je používán pouze pro vypisování určitých informací. Zastává tedy funkci takzvaného stavového řádku. Zobrazuje takové informace jako je zahájení nebo ukončení syntézy, zahájení a ukončení testování doby syntézy a výsledek testu, u déle trvajících operací vypisuje také stav průběhu v procentech. Stav průběhu v procentech

je ještě doplněn informací o čase, který byl nutný pro vypracování odpovídající části úkolu. Důležitou funkcí je také zobrazování upozornění. K tomu dojde, pokud například nastavená hodnota některého z parametrů nesplňuje předem dané podmínky.

### 3.1.1. Rovnice

Pojem rovnice sice může působit poněkud zvláštním dojmem v aplikaci zaměřené na syntézu perkusních nástrojů, ale velmi dobře spojuje všechny prvky v panelu obsažené. Přece jen je pro syntézu využita metoda fyzikálního modelování, které je na rovnicích založeno. Prvky pop-up okna jsou: Rozměr, Typ, Způsob volby hlavního parametru a Souřadná soustava.

*Rozměr (rovnice)* je možné volit mezi položkami "1D" a "2D", tedy mezi jednorozměrnými a dvourozměrnými rovnicemi popisujícími modelované těleso. Význam těchto pojmů by měl být zřejmý z předcházejících kapitol.

*Typ (rovnice)* umožňuje přepínat mezi položkami "vlnová rovnice" a "rovnice pro tuhé těleso". Reprezentují typy rovnic, které jsou použity při syntéze. O těchto pojmech je taktéž pojednáno v předchozím textu.

*Způsob volby hlavního parametru (rovnice)* je závislý na vybraném rozměru a typu rovnice. Výběr z možností ovlivní obsah panelu Nástroje. V zásadě je možné říci, že nastavení "nástroje" lze provést těmito způsoby:

- "jediný parametr";

Nejjednodušší způsob řízení vlastností rovnice. V každé z použitých rovnic je možné všechny fyzikální parametry "poskládat" do jediného parametru, který ovlivňuje celou rovnici, a který je možné zadat přímo, bez ohledu na fyzikální parametry tělesa. Tento způsob nastavení je možné použít ve všech případech, pouze u dvourozměrných těles definovaných v kartézské souřadné soustavě je tento parametr doplněn o nezbytný údaj o poměru stran tělesa

- "fyzické parametry tělesa";

Umožňuje zadávat tvar, rozměry tělesa a typ materiálu nebo jeho vlastnosti, z něhož je těleso vyrobeno

- "fyzické parametry membrány";

U dvourozměrných těles je možné nastavovat parametry membrány. Její vlastnosti jsou určeny rozměry, napětím membrány a její plošnou hustotou

- "hodnota základní frekvence";

Jednorozměrná tělesa modelovaná pomocí vlnové rovnice umožňují zadat přímo hodnotu základní frekvence. Posuvník mění hodnoty exponenciálním způsobem, což je ve shodě s vnímáním frekvence lidským uchem. Díky tomu

ovšem není možné posuvníkem nastavit některé hodnoty. Pro přesné zadávání hodnot je výhodnější použít příslušné editovací okno

- "přednastavené tóny".

Zadávat se přes samostatné modální okno, kde je možné nastavit písmeno tónu, stupnici a případný půltón. Nabídka je dostupná opět pouze u jednorozměrných těles modelovaných pomocí vlnové rovnice

Pro konkrétní případy jsou dostupné pouze vybrané možnosti.

*Souřadná soustava* je pro jednorozměrná tělesa nastavena na kartézskou souřadnou soustavu a pop-up menu je neaktivní, nastavení nelze měnit. Pro dvou- a trojrozměrná tělesa pop-up menu nabízí výběr mezi kartézskou souřadnou soustavou a radiální souřadnou soustavou. Kartézská soustava umožňuje modelování čtvercových a obdélníkových ploch, v závislosti na nastavení poměru stran v panelu *Nástroj*. Dále také zpřístupňuje modelování eliptických ploch do těchto obdélníků vepsaných.

Radiální souřadná soustava slouží pro aproximování těles kruhových tvarů. V závislosti na tomto nastavení se částečně mění význam některých dalších parametrů a prvků.

### 3.1.2. Nástroj

Panel obsahuje všechny potřebné prvky, pomocí kterých je možné nastavovat parametry virtuálního hudebního nástroje. Obsah panelu se liší podle nastavení položek v panelu *Rovnice*. Hlavními částmi jsou pop-up okna *Tvar (nástroje)* a *Tvar průřezu (nástroje)*, panel *Materiál*, panel s proměnným významem a panel *Dutina*.

*Tvar (nástroje)* u jednorozměrných nástrojů indikuje tvar tyče a je neměnitelný. Pro dvou- a trojrozměrné nástroje umožňuje volit mezi položkami "obdélník" a "elipsa" při zvolené kartézské souřadné soustavě, pro radiální soustavu souřadnic je zobrazen neměnný tvar "kruh". Význam je zřejmý, pouze dodejme, že "elipsa" je vepsána do obdélníku nastavitelných parametrů.

*Tvar průřezu (nástroje)* je možné nastavovat pouze u jednorozměrných těles, při způsobu volby hlavního parametru rovnice pomocí "fyzických parametrů tělesa". V tomto případě je možné volit mezi položkami "obdélník", "kruh" a "mezikružní", jak je zachyceno na dříve uvedeném obr. 4. Na základě tohoto nastavení se mění význam některých parametrů v panelu *Fyzické parametry tělesa*. Ve všech dalších případech je parametr *Tvar průřezu* neviditelný.

*Panel Materiál* je viditelný pouze v případě, že chceme nastavovat hlavní parametr rovnice pomocí "fyzických parametrů tělesa". *Materiál* je možné volit přímo z přednastavených materiálů (specifikovaných jejich hustotou, modulem pružnosti a případně Poissonovým číslem), nebo lze zvolit položku "vlastní" a tyto hodnoty si nastavit manuálně.

*Panel s proměnným významem* a především položky v tomto panelu obsažené se mohou značně lišit v závislosti na nastavení celého panelu Rovnice a význam je zřejmý z aktuálního názvu panelu a popisek jednotlivých parametrů. Může se jednat například o rozměry tělesa, jediný parametr rovnice, hodnotu základní frekvence, atd.

Co se týče rozměrů tělesa, pouze drobné upozornění. Nastavujeme-li fyzické rozměry jednorozměrného tělesa, zjistíme, že změna šířky tyče se neprojevuje na hodnotě hlavního parametru rovnice. Nejedná se o chybu, uvedený rozměr skutečně nemá vliv na jmenovaný parametr. Je však nutné jej nastavit v případě, že požadujeme syntézu s nelineárním buzením rovnice. V takové situaci parametr slouží pro výpočet objemu tělesa a podílí se tak na určení hmotnosti modelovaného tělesa.

*Panel Dutina* je viditelný pouze pro dvourozměrná tělesa, jejichž model je vytvořen vlnovou rovnicí, a umožňuje připojit k modelu membrány také model dutiny bubnu. Jde to však pouze v případě, že jsou parametry nástroje zadávány pomocí "fyzických parametrů tělesa" nebo "fyzických parametrů membrány".

Dutina je určena pomocí jejího objemu, napnutí membrány na jednotku délky a výplně dutiny. U výplně lze vybrat přímo médium, kterým je dutina vyplněna (ve všech reálných případech jde o vzduch), nebo je možné si specifikovat vlastní parametry média dutiny pomocí hustoty a rychlosti šíření akustické vlny v daném prostředí (vlnovou rychlostí).

### 3.1.3. Úder (buzení rovnice)

Panel umožňuje nastavení veškerých parametrů souvisejících s vybuzením (rozkmitáním) modelovaného tělesa. V rámci panelu je možné nastavovat rychlost a tvar úderu, zda použijeme lineární či nelineární buzení (a případně nastavit příslušné parametry nelineárního buzení) a místo a rozměry úderu.

*Rychlost úderu* se udává v metrech za sekundu v rozmezí hodnot od 1 do 5. Nastavení ovlivní hlasitost výsledného signálu. Změna hlasitosti je možná i pro již vygenerovaný signál, posuvník tak v jistém smyslu přebírá funkci ovládání hlasitosti. Hodnoty některých rychlostí úderů přibližně odpovídají termínům z oblasti hudební dynamiky a tyto vztahy zachycuje následující tabulka 1..

Tabulka 1. Hudební dynamika a rychlost úderu (zdroj: dostupné z [11])

Hudební dynamika	Rychlost úderu, m s <sup>-1</sup>
piano	0.5
mezzoforte	1.5
fortissimo	5.0

Rychlost úderu je v matematické oblasti převedena na amplitudu počátečního vychýlení tělesa. Pokud použijeme lineární způsob buzení, bude mít nastavená rychlost počátečního úderu vliv pouze na hlasitost výsledného akustického signálu. V případě nelineárního buzení bude rychlost úderu rozhodující i pro další vlastnosti výsledného signálu. Čím větší rychlostí do tělesa udeříme, tím většímu počátečnímu prohnutí tělesa nástroje dojde a tím vyšší frekvence se vybudí. Budeme-li aplikovat buzení na nelineární rovnici, rychlost úderu ovlivní i míru nelinearity.

Tvar (úderu) se nastavuje pomocí pop-up okna a vybíráme tak tvar tělesa, kterým do nástroje udeříme. Dostupné možnosti jsou:

- "Raised Cosine";

Podle nejrůznějších výzkumů je nejvhodnější používat právě tento tvar, nejlépe odpovídá experimentálním výsledkům u reálných hudebních nástrojů

- "Diracův impuls";

Je často využíván jako základní model. V případě zanedbatelných rozměrů paličky vůči tělesu nástroje je zcela dostatečný

- "obdélník".

Předchozí dvě možnosti jsou v aplikaci doplněny o tento tvar, jehož rozměry je možné měnit. Velmi dobře dokresluje možnosti fyzikálního modelování. Nastavená šířka obdélníku má značný vliv na výstupní signál, především na množství vyšších frekvencí v signálu obsažených

*Typ (úderu)* lze volit dvojí, a možnosti jsou:

- "lineární";

Zcela dostatečný typ buzení. Je tak definováno počáteční vychýlení tělesa, které je tím rozkmitáno

- "nelineární".

Nelineární buzení je sofistikovanějším způsobem, jak uvést těleso nástroje do vibrací. Je modelována samotná interakce mezi paličkou a tělesem. Při nastavení nelineárního typu buzení se pod tímto prvkem objeví panel nazvaný Nelineární buzení, který slouží k nastavení všech potřebných parametrů. Uvedená možnost není dostupná, pokud je hlavní parametr rovnice nastavován pomocí "jediného parametru". Ještě připomeňme vliv rychlosti úderu na nelineární buzení, který je zmíněn v odstavci Rychlost úderu

*Panel Nelineární buzení* slouží k nastavení parametrů nelineárního buzení, kterými jsou hmotnost a tuhost paličky a koeficient nelinearity. Koeficient určuje řád nelinearity rovnice, podle níž je vypočítávána interakce mezi nástrojem

a paličkou. Doporučené hodnoty jsou běžně stanovovány experimentálně a v literatuře je často doporučováno rozmezí hodnot od 1,5 do 3,5, přičemž nižší hodnoty se používají pro tuhá, pevná tělesa, vyšší hodnoty pro měkká tělesa a membrány [11], [18], [19]. Vliv tohoto parametru je pro výsledný zvuk poměrně zásadní a je poměrně zajímavé si s tímto posuvníkem "pohrát".

*Rozměry úderu* jsou nastavovány v procentech odpovídajících rozměrů tělesa. Tento způsob byl zvolen s ohledem na universální přístup k danému úkolu, který spočívá v normování všech rozměrů na jednotkovou velikost. V případě radiální souřadné soustavy je příslušným rozměrem průměr celého tělesa. Na téma radiálních souřadnic tělesa ještě dodejme, že pro modelování úderu je i v tomto případě použita souřadná soustava kartézská. Souvisí to jednak se způsobem aproximace a především s logikou věci. Je těžké si představit zadávání rozměrů obdélníku pomocí radiální souřadné soustavy.

*Místo středu úderu* určuje, kam do nástroje udeří střed paličky. Podobně jako v případě rozměrů úderu je i zde použito normování na jednotkové rozměry a způsob zadávání místa na tělese pomocí procentuálního vyjádření. Pokud si tedy přejeme udeřit do levého kraje tyče, nastavíme posuvník doleva na hodnotu 0 %, prostředek tyče představuje 50 % a pravý kraj tyče hodnota 100 %.

Kromě Diracova impulsu je pro zadávání místa úderu do tělesa modelovaného v radiálních souřadnicích použita kartézská souřadná soustava. Díky tomu je však v zásadě možné udeřit i mimo těleso, což samozřejmě způsobí, že výstupní signál bude mít konstantní nulovou úroveň v celém signálu, neboť těleso se nerozkmitá. Místo úderu Diracova impulsu je zadáváno pomocí radiálních souřadnic, tedy přímo určením poloměru (v procentech jednotkového poloměru) a úhlu (také v procentech).

#### **3.1.4. Okraje / Okraj a střed / Okraje a uchycení**

Panel slouží k nastavení okrajových podmínek modelu tělesa. Nastavení se provádí především pomocí dvou pop-up menu, u kterých se mění popisky podle aktuálního významu.

U jednorozměrných těles je možné nastavit podmínky na levém a pravém konci tělesa. Vybírat je možné z několika možností, liší se podle aktuálního nastavení. Většinou je možné volit mezi pevným uchycením konce a volným koncem. V případě modelování tělesa pomocí rovnice pro tuhé těleso bývá k dispozici ještě možnost podloženého konce.

Některé možnosti mají za názvem ještě v závorce uvedeno slovo "vlastní". Nastavení pak odpovídá okrajovým podmínkám, které nejsou matematicky zcela přesné, ale rovněž zaručují stabilitu rovnice. Jejich význam spočívá především v demonstraci širokých možností při využívání fyzikálního modelování.

Jiné možnosti nastavení mají za svým názvem uvedenou číslovku. Jedná se o stejné matematické okrajové podmínky, ale tyto podmínky jsou jinak provedeny v diskrétní oblasti. Jak bylo uvedeno výše, existuje několik možností provedení

diskrétní derivace. Pokud tedy požadujeme podmínku nulové derivace v prostorové oblasti na konci tyče, existuje několik způsobů, kterými je možné tento požadavek splnit. Význam implementace je opět spíše demonstrativní, na výsledný signál nemají tyto rozdíly zásadní vliv. Ve spektrogramu je sice možné vidět jisté odlišnosti, nicméně po akustické stránce jsou signály téměř totožné.

U dvourozměrných těles je situace obdobná, nastavují se podmínky pro celý okraj tělesa a střed tělesa. V určitých případech může dojít k tomu, že je možné použít pouze jeden typ okrajové podmínky. Pop-up menu příslušného nastavení je pak neaktivní a ukazuje typ podmínky, který bude při syntéze použit.

Vždy je dobré mít alespoň jednu z obou možností nastavenou na pevné uchycení. Při nedodržení této zásady je pravděpodobné, že výsledný signál nebude odpovídat očekávání. Například při nastavení obou konců jako volné se bude těleso v podstavě jakoby pohybovat prostorem a výsledný signál bude pouze záznamem tohoto pohybu, bude mimo akustické spektrum.

Naznačený jev je možné kompenzovat pouze v určitých případech. Například při modelování jednorozměrného tělesa pomocí rovnice pro tuhé těleso se v panelu Okraje a uchycení objeví dva posuvníky, které reprezentují uzly, ve kterých je těleso uchyceno. Je tak lépe možné simulovat zvuk například metalofonu nebo xylofonu, který má oba konce tyčí volné a tyče jsou podepřeny přibližně ve vzdálenosti násobku délky a čísla 0,224 od obou konců tyče [20]. Při nastavení obou posuvníků do stejné pozice bude simulováno uchycení pouze v jednom bodě. Pozor, stále však zůstávají platné okrajové podmínky, tedy způsoby uchycení tělesa na jeho koncích.

Pro úplnost uvedme, že podobné uchycení by samozřejmě bylo možné použít i pro vlnovou rovnici. Protože se ale výchylky při vibracích tělesa v tomto případě šíří vždy pouze o jeden aproximační uzel v obou směrech délky tělesa, vlna by v takto uchyceném uzlu narazila a odrazila se. Výsledkem by tedy bylo pouze zkrácení délky tyče a nevedlo by k požadovanému efektu. U rovnice pro tuhé těleso je možné uvedený postup využít, neboť výchylky vibrací se šíří vždy o dva aproximační uzly v obou směrech délky tělesa. Část této výchylky tedy "přeskočí" upevněný uzel a vibrace se šíří i za uzlem uchycení.

### 3.1.5. Útlum

Pomocí panelu je možné nastavit všechny parametry související s útlumem výstupního signálu. Nejdůležitějším prvkem panelu je pop-up menu označené jako Typ útlumu. Nabídka obsahuje dvě nebo tři položky v závislosti na typu rovnice, která je použita pro model. Pro vlnovou rovnici jsou k dispozici první dvě položky, u rovnice pro tuhé těleso se k nim přidává třetí.

Jednotlivé položky mají následující význam:

- "bez útlumu";

Rovnice je použita ve své nejjednodušší podobě, bez uvažování ztrát. Amplitudová obálka výsledného signálu bude přibližně konstantní, výsledný signál tedy bude mít v celé své délce přibližně stejnou hlasitost

- "útlum amplitudové obálky";

Amplitudová obálka výsledného signálu bude exponenciálně klesat, dobu dozvuku je možné nastavit přímo zadáním hodnoty do editovacího okna pod diskutovaným pop-up menu

- "frekvenčně závislý útlum".

Nejzajímavějším způsobem ovládní útlumu signálu je možnost nastavení frekvenčně závislého útlumu. Tato volba je dostupná pouze pro modely využívající rovnice pro tuhá tělesa. Po vybrání této možnosti z nabídky pop-up menu se v panelu objeví další čtyři parametry

*Nastavení frekvenčně závislého útlumu* se provádí právě prostřednictvím těchto čtyř parametrů. První dvě editovací okna jsou určeny pro nastavení hodnoty první frekvence a příslušné doby dozvuku, další dvě pak mají stejný význam ovšem pro druhou frekvenci.

Hodnoty parametrů je možné různě kombinovat, musí však být dodrženy dvě podmínky:

- *Doba dozvuku na frekvenci 2* musí být menší nebo rovna *době dozvuku na frekvenci 1*;
- *Frekvence 2* musí být větší než *frekvence 1*.

Na nedodržení těchto podmínek je uživatel upozorněn hlášením v panelu Komentář, nicméně syntéza tím není blokována. Signál tedy může být vygenerován, nelze však zaručit jakékoliv jeho vlastnosti. Na tomto místě je vhodné upozornit, že v některých případech je možné zpozorovat ne zcela očekávaný výsledek i při dodržení výše uvedených pravidel. Z uvedeného důvodu je záhodno uvedené parametry měnit pouze pozvolna a sledovat přitom chování výstupního signálu.

Vliv parametrů na výstupní signál je krátce diskutován v předchozí kapitole.



### 3.1.6. Místo snímání výstupního signálu

Jeden případně dva posuvníky obsažené v panelu nastavují bod, jehož výchylky budou v průběhu syntézy zaznamenávány a poslouží tak k vytvoření výsledného akustického signálu. Pro dosažení požadovaného výsledku je důležité umístit pozici snímání mimo uchycená místa tělesa.

Hodnoty jsou posuvníky určovány v jednotkách procent z odpovídajících rozměrů tělesa.

### 3.1.7. Grafické zobrazení

Panel Grafické zobrazení se nachází ve spodní části GUI, přibližně uprostřed. Umístění bylo zvoleno tak, aby byl co nejbližší tlačítku Spustit syntézu, se kterým je částečně funkčně spojen. Pomocí panelu je možné zobrazení celého signálu, spektrogramu celého signálu, signálu v průběhu syntézy a pohybu tělesa při syntéze. Jediným aktivním prvkem je pop-up menu obsahující následující položky:

- "nic";  
Nic není zobrazováno a panel Grafické zobrazení je tak neaktivní
- "signál";  
Pokud je již vygenerovaný nějaký signál (poznáme například podle možnosti stisknutí tlačítka Přehrát v panelu Hlavní nabídka), bude otevřeno samostatné okno s časovým průběhem signálu. V případě, že žádný signál není ještě vygenerován, nestane se nic. Amplituda signálu je pro potřeby grafického znázornění normována, není tím ovlivněna hlasitost akustického signálu
- "spektrogram";  
Pokud je již vygenerovaný nějaký signál (poznáme například podle možnosti stisknutí tlačítka Přehrát v panelu Hlavní nabídka), bude otevřeno samostatné okno se spektrogramem signálu. V případě, že žádný signál není ještě vygenerován, nestane se nic. Některé parametry spektrogramu lze nastavit pomocí menu v položce: Nastavení - Spektrogram
- "signál + spektrogram";  
Kombinuje obě předchozí možnosti a signál i spektrogram jsou umístěny na různých obrázcích ale ve stejném okně pod sebou. Podmínky zobrazení jsou shodné s předchozími dvěma nastaveními
- "signál při syntéze";  
Z počátku nestane nic. Po stisknutí tlačítka Spustit syntézu však bude otevřeno nové okno, ve kterém se bude při syntéze graficky zobrazovat průběžně

aktuální tvar akustického signálu (záznam výchylek bodu zvoleného pro snímání výstupu). V nabídce menu je možné nastavit některé parametry průběžného zobrazování. Jedná se především o délku času mezi aktualizací obrázku, celkový počet obrázků a podobně. Obrázek je aktualizován po každém opakování výpočtu, tedy s takovým časovým krokem, který odpovídá časovému kroku použitému při výpočtu. Ten je určen vzorkovací frekvencí

- "pohyb tělesa při syntéze";

Podobně jako při předchozí uvedené volbě se nejprve nestane nic. Po stisknutí tlačítka Spustit syntézu však bude otevřeno nové okno, ve kterém se bude při syntéze průběžně graficky zobrazovat aktuální tvar modelovaného tělesa. V nabídce menu je možné nastavit některé parametry tohoto průběžného zobrazování. Obrázek je aktualizován po každém opakování výpočtu, tedy s takovým časovým krokem, který odpovídá časovému kroku použitému při výpočtu. Ten je určen vzorkovací frekvencí. Na obrázku jsou očíslovány aproximační body, reálně je však těleso normováno na jednotkové velikosti. Normovaná velikost také souvisí s poměrem tělesa a jeho výchylek. Šířka jednorozměrných těles je vždy stejná, neodpovídá nastaveným hodnotám a není v poměru k ostatním rozměrům. Důvodem je standardní vykreslovací funkce Matlabu.

V menu je možné nastavení parametrů vykreslování tělesa (úhel pohledu, barevné schéma, zapnutí nebo vypnutí zobrazení os)

- "signál + pohyb tělesa při syntéze";

Kombinuje obě předchozí možnosti a signál i spektrogram jsou umístěny na různých obrázcích ale ve stejném okně vedle sebe. Podmínky zobrazení jsou shodné s předchozími dvěma nastaveními

Pro vykreslování všech obrázků jsou použity standardní funkce dostupné v Matlabu. Pokud je cokoli vykreslováno v průběhu syntézy, celkový čas syntézy bude výrazně delší, než je čas odhadovaný.

### 3.1.8. Obrázek

V pravém horním rohu okna aplikace se nachází panel s obrázkem. Jeho název je po většinu času "Těleso" a na obrázku je zachyceno těleso s aktuálními parametry a buzením. Po ukončení syntézy se nadpis panelu změní na "Signál" a na obrázku je časový průběh akustického signálu. K uvedené změně tělesa na signál nedojde, je-li vykreslován průběh syntézy. Při změně libovolného parametru, který má vliv na parametry tělesa nebo buzení se opět zobrazí aktuální stav tělesa. Těleso je zobrazeno standardním způsobem v prostředí Matlab, poměry rozměrů jsou deformovány. Barevné schéma a úhel pohledu odpovídá nastaveným parametrům v menu.

Panel s obrázkem má několik účelů:

- indikace spustitelnosti syntézy;  
Při zobrazení tělesa (případně signálu) je možné spustit syntézu. Červeně přeškrtnutý panel značí, že syntézu nelze spustit
- indikace vybuzení;  
Na první pohled je zřejmé, bude-li těleso vybuzeno a jakým způsobem. Obrázek zachycuje těleso včetně jeho okrajů, které mohou být uchyceny, což má vliv na tvar budícího impulsu. Pokud je zobrazena pouze plocha, nedojde k vybuzení vibrací tělesa
- nastavení úhlu pohledu na těleso;  
Po aktivaci "Otáčení obrázku ukázky" v položce menu *Ovládání* je možné pomocí ukazatele myši těleso "uchopit" a otáčet jím. Mění se tak úhel pohledu na těleso. Po opětovné deaktivaci "Otáčení obrázku ukázky" v menu je poslední úhel pohledu uložen a použit také pro vykreslování poloh tělesa při syntéze
- přehrávání akustického signálu;  
Pokud je "Otáčení obrázku ukázky" neaktivní, kliknutím myši do oblasti panelu obrázku (ale mimo těleso nebo signál) se přehraje akustický signál
- oživení vzhledu okna aplikace.

### 3.1.9. Parametry syntézy

Panel zpřístupňuje nastavení doby trvání signálu, vzorkovací frekvence, typu numerického modelu a částečně také počtu uzlů aproximujících těleso.

*Doba trvání signálu* se nastavuje v sekundách pomocí editovacího okna.

*Vzorkovací frekvence* definuje, s jakým časovým krokem bude prováděn opakovaný výpočet a ovlivňuje šířku frekvenčního pásma výstupního signálu. Jedná se o důležitý parametr i vzhledem k použití výsledného signálu v jiných programech. Doporučuje se používat standardní hodnoty vzorkovacích kmitočtů (44 100 Hz, 16 000 Hz, 8 000 Hz atd.).

Parametr má také vliv na výpočet rovnice pro zajištění stability, neboť ovlivňuje počet uzlů, pomocí kterých je provedena aproximace tělesa. Čím vyšší bude vzorkovací frekvence, tím vyšší bude i počet uzlů. Zmíněného vlivu je možné s výhodou použít například pokud bude při určitém nastavení počet uzlů aproximujících těleso příliš malý. Lze nastavit vyšší vzorkovací kmitočet, provést syntézu a následně signál převzorkovat na požadovanou hodnotu vzorkovací frekvence. Matlab má pro tento účel připravenou funkci `resample`. Naopak, pokud bude při daném nastavení počet dílků příliš velký, snížením vzorkovací frekvence se tento

počet omezí. Příliš vysoké hodnoty budou mít nepříznivý vliv na dobu, která je nutná pro provedení syntézy. Vzorkovací frekvence určuje, kolikrát musí proběhnout opakování výpočtu výstupního signálu na jednu vteřinu signálu.

*Typ použitého numerického modelu* se volí pomocí pop-up okna. Konkrétní modely jsou popsány v předcházející kapitole, zejména pak v části o numerických modelech, kde je uveden kompletní seznam všech implementovaných modelů. U některých typů numerických modelů je možné nastavit i určité parametry ("Alfa" nebo "Theta") prostřednictvím posuvníků. Obecně lze říci, že parametry s názvem "Alfa" ovlivňují šířku spektra výsledného signálu, parametry s názvem "Theta" slouží pro ovládání přesnosti aproximace modelovaného tělesa pomocí dané rovnice. Význam těchto parametrů pro výsledný zvuk je nezanedbatelný, ovšem velmi těžko specifikovatelný. U některých použitých rovnic by bylo možné nastavovat i více těchto parametrů, což by ovšem značně snižovalo uživatelskou přívětivost.

Při syntéze jednorozměrných těles pomocí rovnice pro tuhá tělesa se po volbě typu numerického modelu "proměnný průřez" objeví ve spodní části panelu tlačítka "Definovat podélný průřez tyče".

*Definování vlastního podélného průřezu tyče* je možné provést po stisku uvedeného tlačítka, které otevře samostatné okno. Podotkneme, že se nastavuje v podstatě výška (tloušťka) tyče v závislosti na vzdálenosti daného bodu od začátku tyče. Nejedná se o přesný tvar, určuje se pouze, jak vysoká tyč bude. Šířka tyče zůstává konstantní. Proces zadávání probíhá následujícím způsobem. V okně je bílé pole s mřížkou, délka i výška tělesa je normována na jednotkové hodnoty. Po najetí myši do plochy obrázku se změní kurzor, jehož pomocí se zadávají jednotlivé uzly. Volba uzlu je uskutečněna stiskem libovolného tlačítka myši. Po zadání uzlu se vykreslí propojení mezi právě zvoleným uzlem a uzlem předchozím. Východním bodem je vždy levý horní roh, bodem posledním pak pravý horní roh grafu.

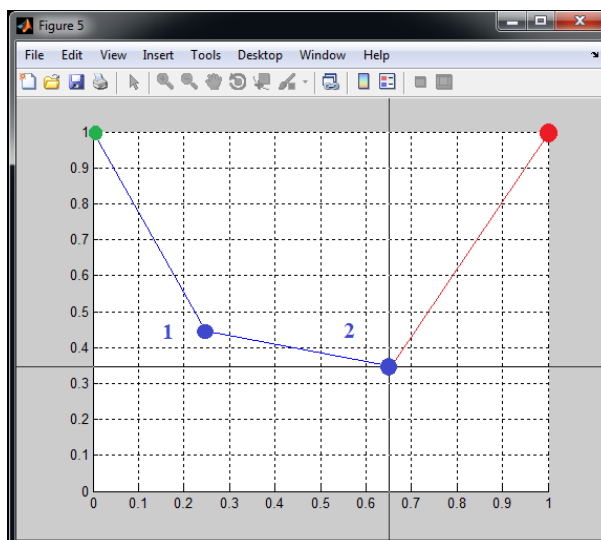
Pro definování platného průběhu výšky tyče v závislosti na délce tyče je nutné, aby byl bod vždy umístěn:

- do grafu (bílé pole s mřížkou) a nikoliv pouze do okna;
- vpravo od uzlu předchozího.

Správný způsob zadávání je ošetřen programově. Bod umístěný do platné pozice je indikován vykreslením propojení s bodem předchozím. Pokud k vykreslení nedojde, zvolený bod je neplatný. Platnost či neplatnost bodu je také indikována pomocí komentáře ve spodní části okna grafického rozhraní aplikace.

První bod je tedy v levém horním rohu grafu. S tímto bodem bude vždy spojen první platný bod zvolený uživatelem. Jednotlivé platné body jsou pak propojovány mezi sebou v pořadí, ve kterém jsou do grafu umísťovány. Poslední bod je v pravé horním rohu grafu. Propojení s tímto bodem není graficky zobrazeno, je doplněno automaticky. Vkládání bodů uživatel ukončí stiskem klávesy

”mezerník”. Příklad volby vlastního průřezu tyče je demonstrován následujícím obrázkem 12.. Barevné body ani čísla nejsou při skutečném zadávání bodů viditelné, v obrázku slouží pro lepší orientaci. První bod je označen zeleně, body zadané uživatelem modře a poslední bod červeně. Číslo 1 označuje první bod zadaný uživatelem, číslo 2 právě zvolený bod. Červené propojení posledního bodu je pouze ukázkové, při skutečném zadávání není naznačené propojení vidět.



Obrázek 12. Zadávání vlastního podélného průřezu tyče (zdroj: vlastní)

*Počet aproximačních bodů* tělesa je indikován pomocí editovacích oken umístěných v samostatném panelu pod panelem Numerický model. Editovací okna jsou vždy neaktivní, hodnotu nelze zadávat přímo, mají pouze informativní charakter. Vlevo od editovacího okna je posuvník, kterým je možné indikovanou hodnotu snižovat. Vyšší hodnotu není možné nastavit, byla by tím ohrožena stabilita rovnice. Posuvník má maximální hodnotu určenu vždy nejvyšším možným počtem bodů aproximujících těleso, kdy je ještě stabilita zaručena. Při změně kteréhokoliv parametru, který tuto hodnotu může změnit, je posuvník vždy nastaven na svou maximální hodnotu, což zajišťuje maximální využití možností syntézy. Minimální hodnota je vždy 3.

Před každým spuštěním syntézy je více než vhodné se na tuto hodnotu podívat. Pro větší hodnoty může syntéza trvat velmi dlouho. Za uvedené situace je výhodné posuvníkem příslušnou hodnotu snížit. Tím nebude ovlivněna hodnota základní frekvence ani vzorkovací frekvence, ale pravděpodobně dojde ke snížení frekvenčního rozsahu výsledného signálu. Posuvník tedy může velmi jednoduše měnit barvu akustického signálu.

U dvourozměrných těles jsou pro informaci o počtu bodů zobrazeny dvě neaktivní editovací okna. V kartézské souřadné soustavě je možné použít jeden posuvník, jenž ovlivňuje hodnoty u prvního i druhého informačního editovacího okna.

Zachovává se poměr stran modelovaného tělesa. U radiální souřadné soustavy první posuvník nastavuje omezení počtu aproximačních bodů v poloměru. Jeho změna ovlivní i druhé editovací okno týkající se aproximačních bodů v úhlu, aby byla zachována podmínka stability a možnosti aproximace využity na maximum. Druhým posuvníkem je pak možné omezit i tuto hodnotu.

*Hlavní parametr rovnice* je posledním údajem zobrazeným zcela vespod panelu Parametry syntézy. Při troše praxe lze na základě zobrazované hodnoty usuzovat na přibližnou základní frekvenci výsledného signálu. Účel okna je ve všech případech nastavení pouze informativní, nikdy není možné hodnotu přímo zadávat. Indikovaná hodnota je vždy aktuální, reaguje na změnu jakéhokoliv parametru, který má na ni vliv.

### 3.1.10. Hlavní nabídka

Panel v sobě sdružuje pět tlačítek, jejichž význam je pro aplikaci zcela zásadní. Jedná se o tlačítka spouštějící syntézu a odhad doby syntézy, přehrávání, ukládání výsledného akustického signálu a možnost přidat šum k signálu.

Tlačítko *Spustit syntézu* spustí syntézu signálu podle parametrů, které jsou aktuálně nastaveny v GUI. Pokud je v panelu Grafické zobrazení nastavena některá z položek "signál při syntéze", "pohyb tělesa při syntéze" nebo "signál + pohyb tělesa při syntéze", dojde ke grafickému zobrazení požadovaných obrázků podle dalších nastavení. Po stisknutí tlačítka Spustit syntézu budou v panelu Komentář postupně zobrazeny informace o zahájení, průběhu a ukončení syntézy. Postup syntézy je též znázorněn pomocí dialogového okna, standardního *waitbar* v Matlabu. Kromě informace o progresu též obsahuje tlačítko "Cancel", jehož prostřednictvím je možné celou syntézu předčasně ukončit.

Po stisku tlačítka *Odhad doby syntézy* proběhne syntéza jako v případě tlačítka Spustit syntézu, pouze s tím rozdílem, že opakování výpočtu rovnice proběhne pouze 10 krát. Čas potřebný pro tento úkon je zaznamenán a společně s údajem o celkovém počtu opakování v případě skutečného spuštění syntézy podle aktuálně nastavených parametrů slouží k odhadu doby syntézy. Vzhledem k tomu, že procesor PC může mezi výpočty obstarávat i jiné požadavky na přidělení procesorového času, může se odhad od skutečnosti značně lišit. Odhad bude vždy buď odpovídající realitě, nebo delší, nikdy kratší. Bohužel jediným způsobem, jak uvedený nedostatek odstranit, je doporučit opakované stisknutí tlačítka Odhad doby syntézy a spolehnout se na nejkratší odhad. Údaj o odhadu je vypisován v panelu Komentář.

Důvodem implementace takto nestandardního tlačítka je vysoká pravděpodobnost, že syntéza zvuku bude probíhat poměrně dlouhou dobu. Čas doby výpočtu je odhadován pouze pro samostatný výpočet, nepočítá se při tom s grafickým zobrazováním průběhu syntézy pomocí panelu Grafické zobrazení, které čas syntézy významně prodlouží.

Tlačítko *Přehrát* spustí přehrání aktuálního signálu. Pokud ještě není žádný signál vygenerován, tlačítko není aktivní.

Tlačítko *Šum* otevírá samostatné modální okno poskytující nástroje pro doplnění signálu o šum. Použité rovnice numerických modelů těles popisují pouze pohyb těchto těles, neumožňují simulování zvuků způsobených samotným úderem. Navázání vhodného typu šumu na začátek signálu je velmi jednoduchým, ovšem efektivním řešením. Popis okna i způsob ovládání šumu je uveden v krátké podkapitole na konci této části práce.

Posledním tlačítkem panelu Hlavní nabídka je tlačítko *Uložit*, které slouží pro ukládání vygenerovaných akustických signálů. Po jeho stisku se otevře běžné dialogové okno pro ukládání. Okno umožňuje vybrat umístění souboru a jeho název. Zvukový signál je ukládán ve formátu WAV. Pomocí položky Soubor v menu je možné signály ukládat také ve formátu MAT.

### 3.1.11. Menu

Menu je standardním prvkem běžných grafických rozhraní aplikací. Dostupnými položkami jsou: Soubor, Ovládání, Nastavení a Nápověda. V následujícím výpisu je v závorce za názvem položky uvedena klávesová zkratka, pokud je přiřazena.

Položka *Soubor*:

- "Uložit jako WAV ..." (Ctrl+U);  
Stejný význam jako tlačítko Uložit v Hlavní nabídce
- "Uložit jako MAT ..." (Ctrl+I);  
Kromě ukládání vygenerovaných signálů ve formátu WAV (dostupného tlačítkem Uložit v panelu Hlavní nabídka) je umožněno také ukládání ve formátu MAT, který je běžný v prostředí Matlab
- "Konec" (Ctrl+K).  
Ukončení aplikace

Položka *Ovládání*:

- "Odhad doby syntézy" (Ctrl+O);
- "Spustit syntézu" (Ctrl+S);
- "Přehrát" (Ctrl+P);
- "Šum" (Ctrl+L);

- "Přepnout rozměr rovnice" (Ctrl+1);
- "Přepnout typ rovnice" (Ctrl+2);
- "Přepnout volbu hl. parametru rovnice" (Ctrl+3);
- "Přepnout souřadnou soustavu rovnice" (Ctrl+4);
- "Otáčení obrázku ukázky" (Ctrl+X);

Jak bylo uvedeno výše, obrázek v pravém horním rohu může sloužit dvěma účelům. Jeho prostřednictvím lze měnit úhel pohledu na těleso nebo přehrávat vygenerovaný akustický signál. Změnou nastavení položky uživatel přepíná právě mezi uvedenými dvěma módy. Je-li volba zaškrtnuta, těleso lze "uchopit" a měnit úhel pohledu. Po opětovném odoznačení položky menu se úhel pohledu uloží také pro potřeby vykreslování obrázků v průběhu syntézy. Po kliknutí do panelu nyní dojde k přehrávání signálu

- "Nezobrazit nic" (Ctrl+V);
- "Zobrazit signál" (Ctrl+B);
- "Zobrazit spektrogram" (Ctrl+N);
- "Zobrazit signál + spektrogram" (Ctrl+M);
- "Zobrazit signál při syntéze" (Ctrl+Q);
- "Zobrazit pohyb tělesa při syntéze" (Ctrl+W);
- "Zobrazit signál + pohyb tělesa při syntéze" (Ctrl+E).

Význam neokomentovaných položek by měl být zřejmý. První tři jsou shodné s tlačítky v panelu Hlavní nabídka, další čtyři zastupují pop-up menu v panelu Rovnice a posledních sedm položek odpovídá nabídce možností pop-up menu panelu Grafické zobrazení.

Položka *Nastavení*:

- "Spektrogram";
  - Maximální frekvence na spektrogramu - běžně se využívá zobrazení celého spektra signálu, tedy v rozmezí od nuly do poloviny vzorkovací frekvence. Maximální hodnotu je však možné zadat i ručně. Využití má význam například



při užívání velmi vysoké vzorkovací frekvence nebo pokud je předmětem zájmu přesnější odečítání základní frekvence

- Počet vzorků pro spektrogram - délka okna pro FFT, implicitně nastavená hodnota je 1024

- "Ukládání";

- Počet bitů pro WAV - výběr z přednastavených možností počtu bitů pro vzorkování hodnot signálu při ukládání ve formátu WAV. Implicitně je zadáno 32 bitů

- "Zobrazení".

- Počet vykreslených kroků při syntéze - lze zadat přímo hodnotu, při nastavení hodnoty "0" bude vykreslován průběh celé syntézy

- Délka pauzy mezi změnou obrázku - zadává se hodnota v sekundách

- Viditelné osy - volba "Ano" poskytuje možnost odečítání hodnot prostřednictvím os, volba "Ne" osy vypíná, obrázek je efektnější

- Barevné schéma - výběr ze tří standardních možností Matlabu (Jet, Gray, Copper)

- Úhel pohledu - umožňuje nastavení pohledu na těleso prostřednictvím přednastavených hodnot azimutu a elevace. Pokud však nejsou požadovány přesné hodnoty, pohodlnější je využít nastavení prostřednictvím obrázku v pravém horním rohu

Položka *Nápověda*:

- "Zobrazit nápovědu ...";

- Otevře text této diplomové práce

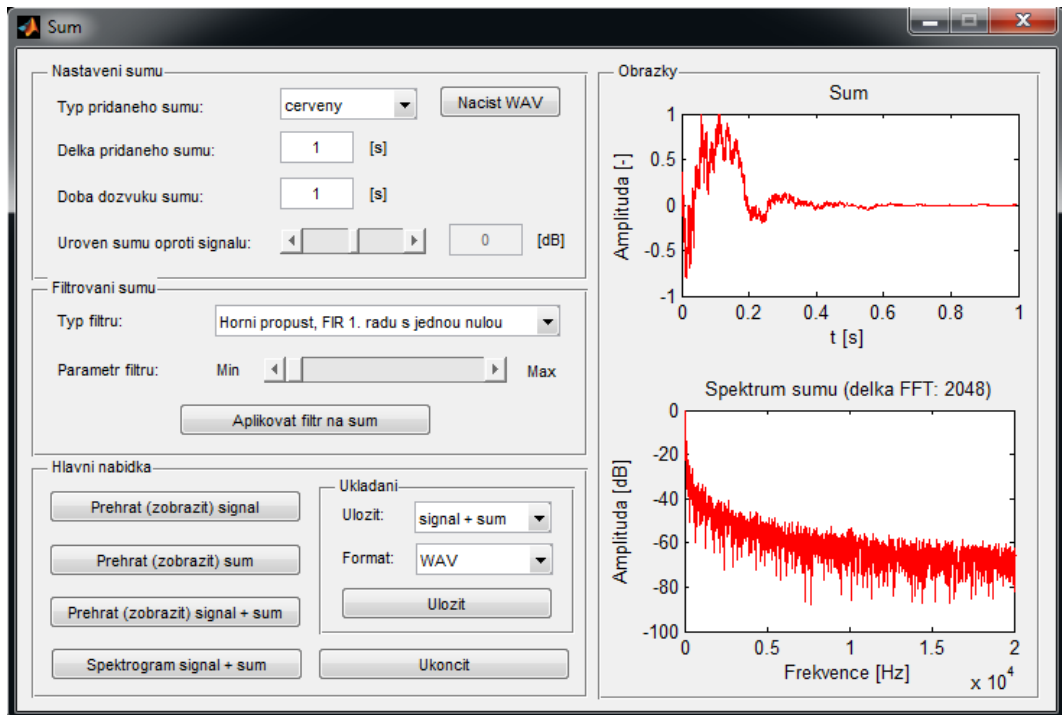
- "O programu ...".

- Podává základní informace o programu (účel, důvod vzniku, autor, atd.)

### 3.1.12. Šum

Stisknutím tlačítka Šum z Hlavní nabídky dojde k otevření nového modálního okna, jehož podoba je na obrázku 13.. Jedná se o malý doplněk vlastní aplikace, jehož účelem je přidávání různých šumů k vygenerovaným signálům. Primárním účelem je simulace zvuku úderu samotného.

První panel slouží k nastavení typu šumu, délky šumu, doby dozvuku šumu a úrovně hlasitosti vztahené k hlasitosti šumu. Délka šumu i dozvuku se nastavují zcela stejným způsobem jako v aplikaci samotné.



Obrázek 13. Šum - modální okno aplikace (zdroj: vlastní)

Typu šumu představují různé barvy šumu, k dispozici jsou možnosti:

- "žádný";
- "bílý" ;  
Rovnoměrné zastoupení všech spektrálních složek
- "červený";  
Frekvenční charakteristika má pokles -6 dB na oktávu (-20 dB na dekádu)
- "růžový";  
Frekvenční charakteristika má pokles -3 dB na oktávu (-10 dB na dekádu)
- "modrý";  
Frekvenční charakteristika roste +3 dB na oktávu (+10 dB na dekádu)
- "fialový".  
Frekvenční charakteristika roste +6 dB na oktávu (+20 dB na dekádu)

Po načtení signálu ve formátu WAV díky tlačítku "Načíst WAV" je uvedená nabídka rozšířena o položku "načtený". Takový signál je možno upravovat stejně jako ostatní, pouze nelze nastavit Délku přidaného šumu a Doba dozvuku šumu.

Panel Filtrování šumu poskytuje nástroje pro další úpravy šumu prostřednictvím velmi jednoduchých filtrů:

- "Horní propust, FIR 1. řádu s jednou nulou";
- "Dolní propust, FIR 1. řádu s jednou nulou";
- "Horní propust, IIR 1. řádu s jedním pólem";
- "Dolní propust, IIR 1. řádu s jedním pólem".

Pro ovládání všech uvedených filtrů postačuje pouze jediný parametr, který se nastavuje jezdcem posuvníku. Posuvník však nemá číselnou stupnici ani není zobrazena konkrétní hodnota parametru, je pouze naznačeno, že pozice jezdce posuvníku vlevo má na signál šumu minimální účinek, pozice v pravo maximální. Zkušenosti s programem ukázali, že výhodnější způsob je nastavení menší hodnoty a opakované aplikování filtrace na signál šumu, dokud není dosažen požadovaný efekt. Filtry je tedy možné používat opakovaně a také bývá výhodné kombinování jejich účinků.

Charakteristiky filtrů není nutné uvádět, konkrétní podoba spektra šumu po filtraci je přímo zobrazena na spodním obrázku. Nastavením bílého šumu a maximální hodnoty parametru pro každý z filtrů si tak každý jistě rychle udělá vlastní obrázek o vlivu filtru na signál šumu.

Panel Hlavní nabídka sdružuje několik tlačítek, význam každého z nich vyplývá z jejich označení. Spektrogram je vykreslován ve stejné podobě, jaká je nastavena v hlavním okně aplikace. Tlačítko "Uložit" ukládá vybraný signál ("signál + šum" nebo "šum") ve formátu zvoleném formátu (WAV nebo MAT) za podmínek nastavených v hlavním okně aplikace.

Poslední panel Obrázky obsahuje jeden nebo dva grafy. První z nich slouží pro vykreslování signálu, šumu, nebo signálu se šumem v časové oblasti. Druhý je aktivní pouze při zobrazování šumu a představuje spektrum šumu.

Filtry je možné používat pouze pro přidávaný šum, nelze je aplikovat na signál. Cílem programového doplňku je simulace zvuku úderu, nikoliv úprava celého signálu zvuku. S fyzikálním modelováním takové úpravy nemají příliš společného a nezdálo se být vhodné naznačenou možnost poskytnout. Nahrávky zvuků reálných signálů pochopitelně prochází jistými úpravami. Stejnými nástroji (programy) však mohou být zpracovány i signály získané aplikací.

Uvedený doplněk aplikace byl vypracován především pomocí skript Úvod do číslicového zpracování signálů: Cvičení [21].

### 3.2. Nastavení syntézy a řešení problémů

Aplikace využívá některé poměrně složité postupy při výpočtech a ne vždy je tak možné zajistit zcela standardní chování celého programu. Navíc grafické uživatelské rozhraní poskytuje značnou kontrolu nad syntézou prostřednictvím velkého množství parametrů, jejichž významy se mohou měnit v závislosti na

dalších nastaveních. Vzhledem k tomu je vhodné uvést alespoň základní postup nastavení syntézy a několik nejdůležitějších poznatků a doporučení týkajících se obsluhy aplikace.

### 3.2.1. Nastavení syntézy

Doporučený *postup nastavení syntézy* je následující. Procházíme všechny panely a nastavujeme každý jednotlivý parametr v nich uvedený. Začínáme vlevo nahoře a postupujeme ze shora dolů a zleva doprava. Volíme tedy nejprve rozměr a typ rovnice, způsob, jakým hodláme nastavovat hlavní parametr rovnice a souřadnou soustavu, ve které je modelované těleso definováno. Vše zahrnuje panel Rovnice.

V panelu Nástroj zadáme nejzákladnější tvary tělesa a určíme, z jakého materiálu je těleso zhotoveno, nastavíme jeho fyzické rozměry a pokud se chystáme modelovat buben s dutinou připojenou k membráně, zadáme také fyzické parametry dutiny bubnu. Nastavování většiny uvedeného odpadá, pokud chceme ovládat vlastnosti tělesa pouze jedním parametrem.

Panel Úder (buzení rovnice) sdružuje veškeré parametry pro nastavení vybuzení rovnice. Nastavíme rychlost úderu (slouží pro určení hlasitosti výsledného signálu a lze ji měnit i po ukončení syntézy), tvar budícího impulsu a typ buzení. Nelineární buzení vyžaduje nastavení dodatečných údajů v odděleném podpanelu. Dále určíme rozměry zvoleného budícího impulsu a místo tělesa, do kterého si přejeme udeřit.

Okrajové podmínky (a případně i uchycení) se nastavují v dalším samostatném panelu, stejně tak i způsob útlumu vibrací tělesa v průběhu času. Místo snímání výstupního signálu se rovněž nastavuje odděleně.

Po nastavení předchozích panelů je vhodné pokračovat zadáním délky trvání signálu, vzorkovací frekvence a volbou numerického modelu v panelu Parametry syntézy. V tomtéž panelu je dále užitečné zkontrolovat počet aproximačních uzlů, kterými je těleso modelováno, a případně jejich počet omezit.

Na závěr je možné si nastavit údaje, které budou v průběhu syntézy nebo po jejím dokončení graficky zobrazeny pomocí panelu Grafické zobrazení. Umístění uvedeného panelu zcela neodpovídá doporučenému postupu zadávání hodnot, bylo zvoleno s ohledem na rozměry jednotlivých panelů a omezením prostoru v okně aplikace.

Nyní nezbývá než spustit syntézu stejnojmenným tlačítkem v panelu Hlavní nabídka, popřípadě si ještě předtím ověřit odhad doby trvání syntézy.

Po ukončení vlastní syntézy je ještě dále možné výsledný signál obohatit připojením šumu prostřednictvím modálního okna s názvem Šum, které se objeví po stisku tlačítka Šum v Hlavní nabídce. Primárním účelem je simulace zvuku úderu paličky do tělesa nástroje, jak je uvedeno výše.

Veškeré potřebné informace ohledně nastavování jednotlivých parametrů syntézy by měly být dostupné z výše uvedeného textu, praktické rady a způsoby řešení nejčastějších problémů se nachází v následující podkapitole.

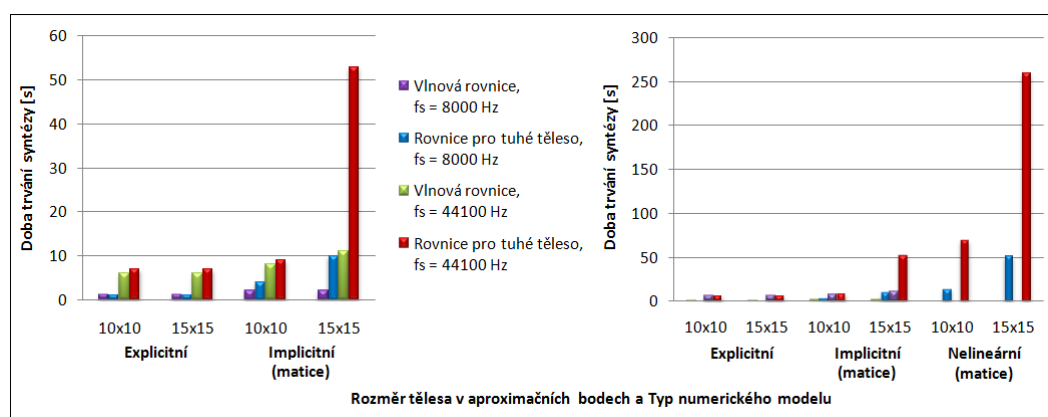
### 3.2.2. Řešení problémů

Následující krátký text popisuje nejčastější obtíže spojené s obsluhou aplikace a navrhuje jejich řešení.

*Čas trvání syntézy* je jedním ze zásadních problémů virtuální akustické syntézy, který brání širšímu využití v běžných syntezeátorech, a není tomu jinak ani v této aplikaci. Vzhledem k existenci značné pravděpodobnosti, že syntéza zvuku bude probíhat poměrně dlouhou dobu, lze doporučit před každým spuštěním ověřit odhad doby syntézy pomocí příslušného tlačítka. Pozor, v některých případech může i samotný odhad doby syntézy trvat velmi dlouhou dobu.

Doba syntézy je ovlivněna numerickým modelem použitým pro výpočet a především počtem bodů (uzlů), kterými je těleso aproximováno. Počty těchto bodů je možné odečíst v panelu Parametry syntézy. Čím vyšší budou hodnoty u těchto položek, tím delší čas bude syntéza trvat. U dvourozměrných těles je třeba brát v úvahu, že počty bodů představují pouze počet bodů pro každý rozměr. Pro celkový počet bodů je potřeba čísla mezi sebou vynásobit.

Orientační dobu trvání syntézy v sekundách pro tři různé numerické modely (explicitní, implicitní, nelineární), dva různé rozměry těles (10x10 a 15x15 v počtu aproximačních bodů) a dvě rozdílné vzorkovací frekvence (8000 Hz, 44100 Hz) ukazuje následující obrázek 14.. Obrázek obsahuje dva grafy pro lepší čitelnost hodnot v prvním grafu. Druhý graf je totožný s prvním grafem, pouze rozšířený o nelineární numerický model.



Obrázek 14. Doba trvání syntézy (zdroj: vlastní)

Čas trvání syntézy je možné zkrátit několika způsoby:

- nastavit kratší čas trvání signálu;
- snížit vzorkovací frekvenci;  
Snížení povede k omezení frekvenčního rozsahu vygenerovaného signálu
- snížit počet bodů aproximujících těleso;  
Pravděpodobně se omezí výskyt vyšších frekvencí, které by jinak byly v signálu přítomny. Tímto způsobem lze značně měnit výslednou barvu signálu, aniž by změny měli vliv na základní frekvenci signálu
- vybrat jiný numerický model;  
Složitost výpočtu jednotlivých modelů není zpravidla stejná. Nejdelsí dobu pro výpočet potřebují rovnice nelineární. O něco kratší jsou modely realizovaná pomocí matic. Nejkratší čas vyžadují rovnice explicitní. O jednotlivých numerických modelech viz podkapitola věnovaná tomuto tématu
- změnit nastavení parametrů nástroje.  
Pravděpodobně povede ke změně hodnoty hlavního parametru rovnice, čímž bude ovlivněna podmínka stability rovnice, což povede ke změně počtu bodů aproximujících těleso. Výsledkem bude jiný zvuk

Poměrně častým jevem při práci s aplikací je, že *výstupní signál má konstantní nulovou hodnotu*, což může mít několik příčin:

- První možnou příčinou je nastavení bodu snímání do místa tělesa, ve kterém je těleso uchyceno. Takový bod tělesa pochopitelně nekmitá a není tak možné získat akustický signál. Řešením je změnit umístění bodu snímání výstupního signálu pomocí posuvníku (posuvníků) v panelu Místo snímání výstupního signálu;
- Druhou možnou příčinou je nastavení úderu (buzení rovnice). Místo úderu může být nastaveno do bodu tělesa, ve kterém je těleso uchyceno, což těleso zpravidla nerozkmitá. Řešením je změnit místo úderu pomocí posuvníku (posuvníků) v podpanelu Místo středu úderu umístěném vespod panelu Úder (buzení rovnice);
- Dále je možné, že šířka úderu je nastavena na příliš nízkou hodnotu a není možné ji podle nastavených parametrů spolehlivě aproximovat pomocí aktuálního počtu bodů aproximujících těleso. Problém se vyřeší zvětšením šířky úderu pomocí posuvníku (posuvníků) podpanelu Rozměry úderu v panelu Úder (buzení rovnice);

- V některých případech se rovněž stává, že je úder umístěn zcela mimo těleso. K tomu může dojít především u dvourozměrných těles definovaných v radiálních, kde je určování pozice místa úderu a určování rozměrů úderu zadáváno pomocí kartézské souřadné soustavy (kromě Diracova impulsu). Odstanění uvedeného nedostatku se provede umístěním středu místa úderu do jiného bodu pomocí příslušných posuvníků.

V případě, že žádná z předchozích rad nepomohla problém odstranit, lze doporučit pouze následující:

- Zobrazit časový průběh akustického signálu pomocí panelu Grafické zobrazení. Příležitostně může dojít k nepodařené syntéze, například vlivem nastavení všech okrajových podmínek jako "volné". Je-li vzhled signálu nestandardní, prověřit nastavení všech prvků;
- Zkontrolovat nastavení hlasitosti výstupního signálu, případně ji zvýšit posuvníkem Rychlost úderu;
- Zkontrolovat nastavení hlasitosti PC;
- Zkontrolovat připojení reproduktorů k PC;
- Zkontrolovat nastavení zvukové karty PC.

Poslední zmíněnou vlastností aplikace, která může způsobit nepříjemnosti, je spojena s *přerušováním výpočtů syntézy*. K tomuto účelu slouží tlačítka "Cancel", umístěné na waitbaru, okně vyskakujícím při každém spuštění syntézy.

Použití tlačítka se může zdát nesnadné, především pokud je průběh syntézy vykreslován. Za takových podmínek totiž aktivitu vždy přebírá okno s novým obrázkem, čímž pravděpodobně překryje i waitbar s tlačítkem. Stačí ovšem přesunout obrázek stranou a opakovaně klikat na tlačítka, přerušení bude dosaženo. Reakce se nemusí projevit okamžitě, záleží na době potřebné pro jeden cyklus výpočtů.

*Za účelem přerušení syntézy je nutné použít výhradně tlačítka "Cancel" na waitbaru!* Nestandardní způsob ukončení (například klávesovou zkratkou Ctrl+C) povede k nestandardnímu chování aplikace. Pravděpodobně nebude možné odstranit okno waitbaru a komplikace mohou nastat i při vypínání Matlabu jako takového.

## 4. Hodnocení

Závěrečná kapitola je rozdělena do tří hlavních částí. První část je věnována zhodnocení možností, které vypracovaná aplikace poskytuje za účelem syntézy zvuků napodobujících perkusní nástroje. Jsou zde v krátkosti zmíněny vlivy vybraných parametrů na výsledné akustické signály. Druhá část se zabývá tvorbou zvuků podle předlohy představované nahrávkou zvuku reálného hudebního nástroje. V poslední části jsou představeny syntetické zvuky vyprodukované pomocí aplikace, které jsou něčím nové, originální.

### 4.1. Možnosti aplikace

Z výše uvedeného popisu grafického uživatelského rozhraní zřejmé, že aplikace umožňuje nastavování značného množství parametrů. Následující text představuje vliv vybraných parametrů na výsledný syntetický zvuk.

Pod heslem hlásajícím, že jeden obrázek je lepší než tisíc slov, jsou rozdíly mezi signály způsobené změnou jednoho parametru demonstrovány prostřednictvím obrázků, především pak spektrogramů signálů. Na spektrogramech je možné si všimnout nejnižší frekvence přítomné v signálu, často udávající základní tón zvuku, počtu dalších přítomných frekvencí udávajících barvu tónu a také frekvenčního rozsahu signálu, tvořeného nejnižší a nejvyšší zastoupenou frekvencí v signálu. Uvedenými vlastnostmi se vzájemně liší spektrogramy umístěné do stejných obrázků, jak je vidět například na obrázku 15.

Některé z obrázků zachycují kromě spektrogramů také znázornění tělesa související s příslušnými spektrogramy. Obrázky těles jsou převzaty přímo z aplikace a jejich barevné provedení tomu samozřejmě odpovídá, rozdílné barvy tělesa nemají žádnou souvislost s barevným provedením spektrogramů.

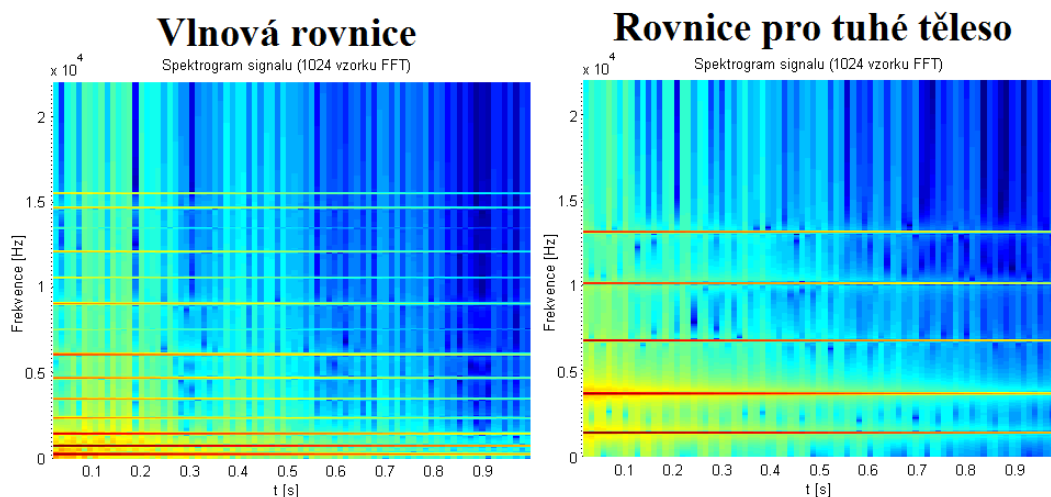
Veškeré obrázky zachycující spektrogramy zvuků jsou navíc doplněny tabulkami uvádějícími nastavení všech parametrů v grafickém uživatelském rozhraní při pořizování odpovídajících signálů a zvukovými záznamy na přiloženém CD ve formátu WAV. Názvy tabulek i adresáře obsahující nahrávky mají pro snadnou orientaci stejné názvy jako příslušné obrázky. V tabulkách je parametr, jehož hodnoty byly měněny, zvýrazněn kurzívou, jednotlivé hodnoty jsou očíslovány. Občas se vyskytují také očíslované hodnoty, které však nejsou zvýrazněny kurzívou. Ke změně těchto hodnot došlo vlivem změny úmyslně pozměňovaných parametrů.

Z důvodu velkého množství jsou téměř všechny obrázky i tabulky vloženy za text práce do příloh. Podívejme se však již na diskutované obrázky s velmi stručným popisem. Pořadí je zvoleno v zásadě ve shodě s postupem nastavování parametrů v aplikaci, na závěr jsou ponechány vybrané parametry samotného tělesa, rozšíření rovnice (připojením dutiny) a porovnání výsledných signálů získaných snímáním vibrací dvourozměrných kruhových těles modelovaných v radiální a kartézské souřadné soustavě.

Jako první v pořadí je porovnání použití *různých typů jednorozměrných rovnic*



se všemi ostatními parametry ponechanými beze změny uvedené na obrázku 15.. Signál získaný vlnovou rovnicí má v tomto případě výrazně nižší základní frekvenci, je v něm obsaženo více frekvencí a rovněž frekvenční rozsah je větší. Připomíná více drnknutí do dlouhé a ne příliš napjaté struny. Oproti tomu signál získaný rovnicí pro tuhé těleso odpovídá spíše cinknutí do krátkého, kovového předmětu. Na volbě typu rovnice je tedy výsledný signál velmi závislý.



Obrázek 15. Různé typy rovnic (zdroj: vlastní)

Porovnání *různých typů úderů* na obrázku 19. ukazuje, že za použití Diracova impulsu je frekvenční spektrum zdaleka nejširší. Rovněž spektrum signálu vybuděného obdélníkovým impulsem je velmi široké, ovšem amplituda jednotlivých frekvencí postupně klesá výrazně rychleji, než při buzení Diracovým impulsem. Spektrum signálu vybuděného pomocí impulsu ve tvaru Raised Cosine je mnohem užší, než v předchozích dvou případech. Frekvence ve všech spektrogramech mají stejné hodnoty, včetně frekvence základní. První signál působí velmi ostrým dojmem, u dalších se tento efekt postupně snižuje.

Podobný efekt jako změna typu úderu má také zvětšování *šířky úderu*, viz obrázek 20.. Rozdíl je v možné plynulé regulaci popsaneho efektu. Zvuk působí stále více tupějším dojmem při zvětšování šířky úderu.

Zkoumání vlivu *rozdílných umístění středu úderu* přináší dva zásadní poznatky zdokumentované obrázkem 21.. Jednak umístění úderu příliš blízko k uchyceným okrajům způsobí deformaci úderu. Budící impuls je tak zpravidla ostřejší a dojde k vybudění i vyšších frekvencí, než se mohlo očekávat. Výsledkem je ostřejší zvuk. Druhým zjištěným faktem je potvrzení předpokládaného jevu, a sice že umístěním úderu do některých míst dojde k potlačení vybraných vyšších harmonických frekvencí. Výsledným efektem je změna barvy tónu.

Zvyšování počtu frekvencí přítomných ve výsledném signálu je kromě výše uvedeného možné také prostřednictvím nelineárního buzení například *změnou tuhosti paličky*, jak je patrné z obrázku 22..

Aplikace dále umožňuje volbu několika *způsobů uchycení* vibrujících předmětů. Nejširší nabídka je dostupná pro jednorozměrná tělesa modelovaná rovnicí pro tuhé těleso. Změna způsobu uchycení má výrazný, těžko popsatelný vliv na signál, viz obrázek 23.. Dochází ke změnám základní frekvence, počtu vyšších frekvencí a tím i jejich vzájemné vzdálenosti. Podobný efekt je možné pozorovat i u dvourozměrných těles, jak dokládá obrázek 24.. Způsoby uchycení tyče je navíc možné různě kombinovat.

Přestože by se mohlo zdát, že je-li těleso jednou rozvibrováno, není možné dále ovlivňovat výsledný signál, pravý opak je pravdou. Na získaný zvuk má totiž jistý vliv také *místo snímání výstupního signálu*. Změny jsou vyvolány například umístěním bodu záznamu výchylek tělesa do různé vzdálenosti od uchycených částí tělesa nebo vybráním určitých uzlů vibrací. Podkladem pro tvrzení je obrázek 25..

Nyní se již dostáváme k numerickým modelům a jejich vlivu na signál. Pochopitelně nemá význam vzájemně porovnávat podobné numerické modely (například "explicitní" a "explicitní (matice)" numerický model stejného rozměru a typu rovnice), neboť je přímo vyžadováno, aby výsledky jimi získané byly zcela shodné, což je v rámci aplikace dodrženo. Implementování podobných modelů má spíše demonstrovat různé možnosti řešení rovnic a ověření jejich funkčnosti.

Podívejme se spíše například na *vliv parametru Theta*, který je zahrnut do některých numerických modelů a jehož hodnotu je případně možné měnit. Obrázek 26. předkládá důkaz o významném vlivu tohoto nevýrazného parametru na výsledný signál. Změna je pozorovatelná jak v počtu frekvencí obsažených v signálu, tak i v základní frekvenci. Při hodnotě parametru 0.51 se navíc v tomto konkrétním případě objevují vyšší frekvence, jejichž spektrální čára ovšem končí výrazně dříve a dodávají tak výslednému zvuku na začátku efekt cinknutí.

Další zajímavou možností aplikace je *definování vlastního průřezu tyče* pro jednorozměrná tělesa modelovaná rovnicí pro tuhé těleso a po volbě patřičného numerického modelu. Vliv změny průřezu tyče na výsledný signál je však velmi komplexní a prakticky téměř nepopsatelný, jak se uvádí i v odborné literatuře. Pro potřeby ukázky zachycené na obrázku 30. byl zvolen standardní obdélníkový průřez a často používaný průřez zachycený ve spodní části obrázku.

Pěkného efektu je také možné dosáhnout použitím nelineárních modelů, přičemž *míra nelinearity* je ovlivňována rychlostí úderu. Obrázek 28. zobrazuje jeden signál získaný lineárním modelem a dva signály vygenerované pomocí nelineárního modelu s různou měrou nelinearity. Na začátku signálu dochází ke změně všech frekvencí v průběhu času, čímž je docíleno "klouzavého" zvuku.

Klíčovým prvkem pro celou aplikaci je možnost volit *počet aproximačních uzlů*. Velmi často je nutné hodnotu uvedeného parametru snižovat již z důvodu samotné funkčnosti aplikace, lépe řečeno pro stanovení přijatelných podmínek

náročnosti zpracování požadovaných dat výpočetním systémem. Jak je však vidět na obrázku 29., snižování počtu aproximačních bodů neodvratně vede k omezení frekvenčního rozsahu signálu. Často se však může jednat také o požadovaný efekt, neboť snížením počtu frekvencí obsažených ve výsledném zvuku dochází k zajímavým jevům, které obohacují možnosti aplikace.

Zaměříme se dále na fyzické parametry modelovaných těles. Nastavené hodnoty přímo mění hlavní parametr každé z rovnic, čímž pochopitelně zcela zásadním způsobem ovlivňují výsledný zvuk. Pro ukázkou byl jako první vybrán parametr *průřez tyče*. Je možné volit ze tří přednastavených možností (obdélník, kruh a mezikruží), které mohou být nejčastěji použity u reálných nástrojů. Ukázka průřezů i odpovídajících spektrogramů se nachází na obrázku 30..

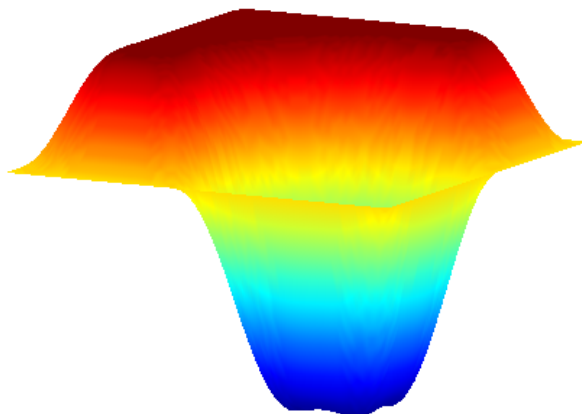
Druhým zajímavým prvkem při užívání fyzikálního modelování je použití hodnot fyzických parametrů obvyklých i poměrně nestandardních, ovšem *reálných materiálů*. Obrázek 31. předkládá spektrogramy pro tyče vyrobené z mosazi, dubového dřeva, oceli a skla, které mohou patřit k běžně používaným materiálům pro výrobu hudebních nástrojů. Oproti tomu na obrázku 32. jsou zachyceny spektrogramy signálů, které by teoreticky měly vydávat tyče vyrobené z ledu a diamantu.

Obraťme nyní pozornost také na dvourozměrná tělesa. Obrázek 33. přináší informaci o vlivu *napětí membrány* na zvuk generovaný právě kmitáním membrány. Zvyšováním napínavých sil dochází ke zvyšování základní frekvence signálu a ke vzájemnému vzdalování frekvencí zastoupených ve frekvenčním spektru signálu. Dochází tak k pomyslnému ladění hudebního nástroje.

Napínání membrány je zcela běžné u reálných hudebních nástrojů. Méně často se ale vyskytují dvourozměrné nástroje (bubny, činely, atd.), jejichž *plocha má nesouměrné rozměry*. Na obrázku 34. jsou zachyceny spektrogramy signálů, které by pravděpodobně vydávaly obdélníkové membrány s poměry stran 1:1, 1:2 a 1:10. V praxi by mohlo vyrobení nástrojů s různými poměry stran působit jisté konstrukční obtíže, ovšem zapojením fyzikálního modelování je tento proces redukován na jeden úkon nastavení příslušného parametru. Omezenou četnost výskytu reálných membrán, činelů a zvonů s obdélníkovým půdorysem snad ani není potřeba příliš zdůrazňovat.

Rozšířením rovnice, představující numerický model membrány, aplikace zpřístupňuje připojení dutiny k membráně. Tímto způsobem dochází k jevu, který je zachycen na obrázku 16.. Jak již bylo popsáno, v dutině se následkem úderu do membrány a jejím prohnutím zvýší tlak, což je kompenzováno vychýlením zbývajících částí membrány ve směru opačném ke směru úderu. Samozřejmě v průběhu kmitání membrány dochází také k opačným případům, tedy ke vzniku podtlaku a snaze membrány tento stav kompenzovat. Různá velikost dutiny neovlivní výsledný signál natolik, aby byl efekt patrný ze spektrogramu, ale při poslechu odpovídajících zvukových záznamů lze jistě rozdíly postřehnout.

Na závěr této části bylo ponecháno porovnání výsledků syntézy kruhových membrán definovaných v radiální a kartézské souřadné soustavě. Z obrázku 35. je patrné, že nelze počítat se shodnými výsledky při zachování stejné hodnoty



Obrázek 16. Efekt připojení dutiny k membráně (zdroj: vlastní)

hlavního parametru rovnice. Je-li však uvedený parametr příslušným způsobem pozměněn, kruhové těleso aproximované body uspořádanými do kartézské souřadné soustavy dává výsledný zvuk značně podobný zvuku generovaného membránou definovanou v radiální souřadné soustavě.

Ve výčtu možností aplikace by bylo možné ještě pokračovat, v zájmu stručnosti se však omezíme na výše uvedené. Vypracovaná aplikace poskytuje širokou škálu parametrů, jejíž ovládním lze generovat nepřeberné množství rozdílných zvuků.

## 4.2. Porovnání s reálnými nástroji

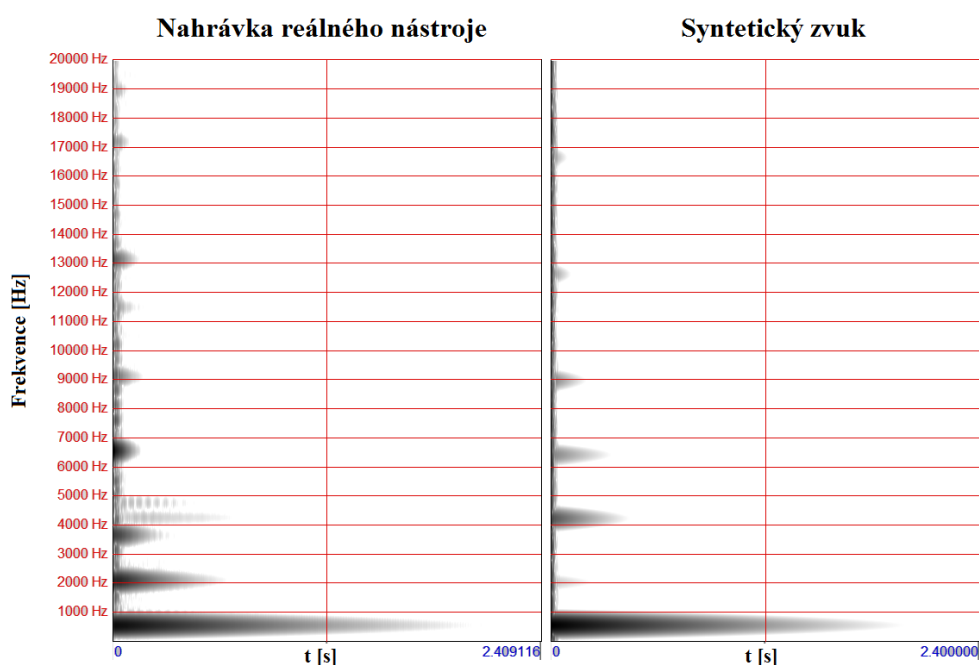
Porovnávání zvuků vydávaných reálnými hudebními nástroji se zvuky syntetickými, generovanými pomocí aplikace, se neobejde bez dostatečně kvalitních zvukových záznamů skutečných nástrojů. Veškeré nahrávky použité za tímto účelem pochází ze serveru [freesound.org](http://freesound.org) [22]. Pro přehrávání záznamů a zobrazování jejich časových průběhů a spektrogramů byl vybrán program Praat ve verzi 5.3.32. Z prostředí uvedeného programu také pochází dále umístěné obrázky spektrogramů. Příložené CD obsahuje všechny níže popisované nahrávky reálných nástrojů i uměle vytvořené zvuky.

Průběh celého procesu je možné popsat velmi jednoduše. Po stažení nahrávky zvukového záznamu hudebního nástroje byl získaný signál otevřen programem Praat a poslechnut. V grafické podobě se jevílo jako nejvýhodnější zobrazovat signál především ve formě spektrogramu, neboť přináší nejvíce relevantních informací potřebných pro pokus o rekonstrukci daného zvuku pomocí vlastní aplikace. Za nejdůležitější údaje lze považovat hodnotu nejnižší a nejvyšší frekvence obsažené v signálu, hodnoty vyšších frekvencí a dobu, po kterou jsou v signálu patrné. V grafickém uživatelském rozhraní aplikace proběhl výběr vhodného rozměru a typu rovnice. Postupnou úpravou všech přístupných parametrů

byla snaha dosáhnout syntetického zvuku, který by se co možná nejvíce blížil předloze. O tom, jak se dařilo vytyčeného cíle dosáhnout, pojednávají následující podkapitoly. Již nyní je však možné předeslat, že vzhledem ke značnému množství parametrů bylo velmi obtížné a pracné alespoň se přiblížit kvalitnímu zvuku.

#### 4.2.1. Metalofon

Prvním modelovaným nástrojem byl metalofon. Obrázek 17. zachycuje spektrogram nahrávky reálného nástroje i jeho syntetického protějšku při tónu C2, jehož základní frekvence je 523 Hz. Zobrazená délka znění tónu je přibližně 2.4 sekundy a frekvenční rozsah je od 0 do 20 000 Hz. Uvedeného signálu bylo dosaženo nastavením hodnot parametrů, jenž zachycuje tabulka 20. v příloze, použitý model tělesa: Euler-Bernoulliho model tuhé tyče.



Obrázek 17. Metalofon, tón C2 (zdroj: vlastní)

Nastavení základní frekvence a délky jejího znění nečiní téměř žádné obtíže. Několik málo pokusů postačuje pro nalezení vhodné hodnoty hlavního parametru rovnice i doby znění signálu. Problematictější úlohou je ovšem zajištění takových podmínek, aby signál obsahoval i vyšší frekvence o správných hodnotách. Přestože je intenzita druhé frekvence u syntetického signálu výrazně nižší než u originálu, pozorný pohled do spektrogramu vpravo odhalí, že i syntetický signál obsahuje frekvenční složku na hodnotě kolem 2 000 Hz. Ostatní frekvence syntetického signálu jsou velmi podobné těm v nahrávce skutečného metalofonu. Nepatrný šum na začátku signálu v celé šířce spektra je u reálného nástroje následkem

kontaktem mezi paličkou a tělesem nástroje, do umělého signálu byl doplněn, je představován mírně filtrovaným červeným šumem.

Přestože uvedený výsledek v grafické podobě pravděpodobně nepůsobí příliš přesvědčivým dojmem, při poslechu není rozpoznání originálního zvuku od syntetického zcela snadné. Generované frekvence v zásadě odpovídají skutečným hodnotám. Navíc je možné předpokládat, že další pokusy by mohly výsledky ještě vylepšit. Dopadne-li simulace zvuku xylofonu obdobným způsobem, lze představený Euler-Bernoulliho model tuhé tyče považovat za kvalitní.

#### 4.2.2. Xylofon

Vzhledem k tomu, že způsob vydávání zvuku xylofonu se v zásadě nijak neliší od metalofonu, přejdeme rovnou ke zhodnocení výsledku, podloženého obrázkem 36., nastavené parametry viz 21., obojí v přílohách.

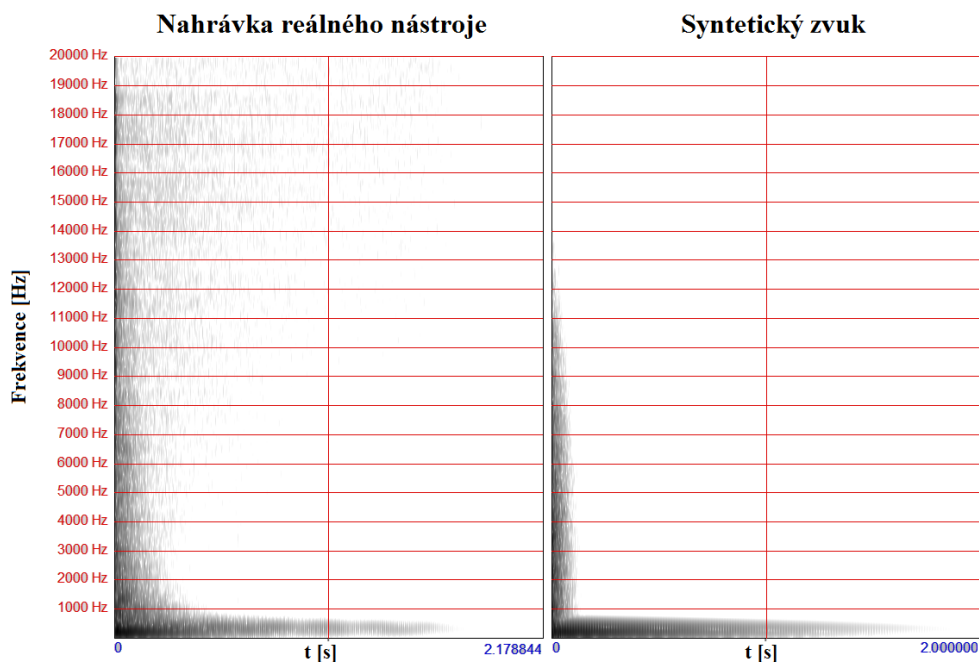
V podstatě jediným, čím se od sebe liší metalofon a xylofon, je materiál, z něhož jsou tyče vyrobeny. Díky tomu je také doba dozvuku u xylofonu kratší. Podobně jako je tomu u metalofonu, i pro xylofon je snadné nastavit základní frekvenci a délku signálu. Na druhou stranu nastavení všech parametrů na hodnoty, které zajistí i stejné hodnoty vyšších frekvencí ve výsledném signálu, je poměrně pracné. Spokojme se tedy i s uvedenou podobností, neboť začátek signálu je stejně částečně "zastíněn" zvukem budícího úderu, což v kombinaci s poměrně krátkou délkou signálu činí přesné hodnoty vyšších frekvencí méně významné. Šum v začátku originálního signálu je u syntetického signálu nahrazen bílým šumem, přičemž vyšší i nižší frekvence jsou odfiltrovány. Efekt samozřejmě není dokonalý, nicméně uvážíme-li jednoduchost, se kterou byl dosažen, lze výsledek považovat za uspokojivý.

Euler-Bernoulliho model tuhé tyče podává kvalitní výsledky také při simulování tyčí (kamenů) xylofonu a lze jej označit za vhodný pro podobné účely. Jak obstojí modely dvourozměrných těles při porovnávání jimi produkovanými zvuky s realitou, je předmětem následující části práce.

#### 4.2.3. Rámový buben

Za účelem modelování membrán je nejvhodnější použít dvourozměrnou vlnovou rovnici. Obrázek 18. ukazuje porovnání spektrogramů nahrávky reálného rámového bubnu a syntetického zvuku. Přesné hodnoty nastavené u všech parametrů jsou zaznamenány v tabulce 22. v příloze.

Ze vzájemného porovnání spodních částí obou spektrogramů vyplývá, že reálný zvuk vydávaný samotnou membránou je od syntetického zvuku prakticky nerozeznatelný. Komplikace však opět působí šum vznikající při úderu samotném. U syntetického zvuku je šum doplněn a tvoří jej červený šum filtrovaný dolní propustí. V zájmu objektivity je nutné přiznat, že základní frekvence se v případě použité nahrávky mění. Na začátku signálu je nejvýraznější frekvence o hodnotě



Obrázek 18. Bodhran, běžný úder (zdroj: vlastní)

přibližně 130 Hz, která v průběhu času postupně slábne a výraznější se stává kmitočet kolem 230 Hz. Změna je pravděpodobně způsobena stylem hry, u jiných nahrávek se uvedený jev nevyskytuje. Kvalita zmíněných nahrávek je však nízká a tudíž nevhodná pro použití v práci.

#### 4.2.4. Činel

Důvodem implementace dvourozměrné rovnice pro tuhá tělesa (Kirchhoffova modelu tenkého plátu) do programu, bylo právě modelování nejrůznějších typů činelů. Spektrum záznamu zvuku činelů je poněkud odlišné od všech výše uvedených typů nástrojů. Zvuk je složen z tak obrovského množství jednotlivých frekvencí, že budí dojem šumu.

Tabulka 23. v příloze zachycuje nastavení parametrů pro 15 různých pokusů o syntézu zvuku činelu. Každý ze signálů byl vytvořen kombinací různých hlavních parametrů rovnice (10, 30, 50, 70, 140) a délky signálu (0.2, 0.7 a 3.0 s), přičemž k různým délkám signálů byla volena vhodná doba dozvuku (0.5, 1.4 a 5 s). Činelů existuje celá řada typů a velikostí, do každého činelu je navíc možné udeřit několika způsoby. Proto širší nabídka ukázkových syntetických zvuků, které je možné porovnat s vybranými nahrávkami skutečných činelů. Déle znějící umělé zvuky připomínají činely typu Ride nebo Crash, krátké signály mají blíže ke zvukům vydávaným takzvanými činely Hi-hat. Pod vyššími tóny si představme činely zasažené blíže ke svému uchycenému středu.

Umělé zvuky skutečně obsahují velmi široké spektrum frekvencí nacházejících se velmi blízko u sebe a je možné prohlásit, že svou podstatou skutečně připomínají zvuky některých činelů. Nepříjemnou skutečností ovšem zůstává, že pro zajištění přítomnosti nižších frekvencí v signálu je nezbytné nastavit nízkou hodnotu hlavního parametru rovnice, což ovšem zapříčiní, že výsledný zvuk působí hlubším dojmem, než by bylo žádoucí. Zvýšením hodnoty hlavního parametru rovnice pochopitelně dojde k posunu všech frekvencí směrem k vyšším hodnotám, efekt je ovšem doprovázen také snížením počtu frekvencí a k jejich vzájemnému oddalování.

#### 4.2.5. Zvon

Ač to může působit překvapivě, zvony pravděpodobně patří k nejlépe napodobovaným nástrojům prostřednictvím dvourozměrné rovnice pro tuhá tělesa. Tabulka 24. v příloze obsahuje potřebné údaje k nastavení hodnot všech parametrů využitelných při syntéze zvuků dvou různých zvonů. Amplituda uměle vytvořeného zvuku dokonce také kolísá, i když rychlejším tempem než originál. V případě generování syntetických zvuků napodobujících zvony lze hovořit o značném úspěchu.

### 4.3. Nové zvuky

Složka Nové zvuky na přiloženém CD obsahuje několik ukázek zvuků ve formátu WAV. Označení *nové* dostaly proto, že nevznikaly podle žádné určité předlohy. Výhodou fyzikálního modelování je, že jakmile si vytvoříme funkční model určitého tělesa, můžeme pozměňovat jeho parametry a získávat tak zvuky nové, k nimž bychom za použití jiných metod syntézy neměli přístup. Změny navíc mohou být menší, reálné, nebo jsme schopni prověřovat, jak by se nástroj choval například při méně běžných či extrémních rozměrech, kterých se v reálném světě nepoužívá.

Uveďme si malou ukázkou na výše uvedeném modelu bodhranu. Experimentálně bylo zjištěno nastavení, při kterém je syntetický zvuk alespoň částečně podobný reálnému. Hodnota hlavního parametru  $\kappa$  byla v takovém případě rovna hodnotě 430 a stejné hodnoty lze dosáhnout kupříkladu nastavením fyzických parametrů membrány na hodnoty: průměr = 50 cm, napětí = 3029 N m<sup>-1</sup> a plošná hustota = 0.262 kg m<sup>-2</sup>. Všechny uvedené parametry jsou zcela reálné. Nyní by nás mohlo zajímat, jak by uvedený buben zněl s více nebo méně napjatou membránou. A jaký zvuk by vydával buben se stejnými parametry ale dvojnásobným, nebo pouze pětinným průměrem? Odpovídající syntetické zvuky jsou k nalezení právě ve složce s novými zvuky.

Podobným způsobem by bylo možné pokračovat velmi dlouho. Cílem práce však nebylo vygenerovat všechny varianty zvuků, nýbrž vytvořit nástroj, který je k tomu prostředkem. Uvedený přehled testovaných zvuků je pouhým zlomkem všech testovaných nahrávek a syntetických zvuků.



## Závěr

Teoretická část práce zabývající se syntézou perkusních nástrojů spočívala především ve volbě vhodné metody syntézy a způsobu její realizace. Vybrána byla virtuální akustická syntéza, v současné době nejmodernější a stále ne příliš rozšířená metoda generování zvuků hudebních nástrojů, využívající matematické rovnice (zpravidla parciální diferenciální rovnice) jako modely hudebních těles. Pro řešení rovnic a práci s modely v diskrétní podobě byla zvolena metoda konečných diferencí v časové oblasti. Poslední krok teoretické části práce spočíval ve výběru konkrétních analytických modelů a jejich převod do diskrétní podoby na modely numerické.

Produktem praktické části práce je zcela nový aplikační software, který zpracovává uživatelem zadané údaje přes grafické uživatelské rozhraní, a na jejich základě generuje zvuky perkusních nástrojů metodou virtuální akustické syntézy. Aplikace poskytuje široké možnosti ovlivňování výsledného akustického signálu prostřednictvím značného množství nastavitelných parametrů syntézy.

Po naprogramování byla aplikace podrobena důkladnému testování a ověřování kvality výsledných akustických signálů porovnáváním s nahrávkami reálných hudebních nástrojů. Cílem bylo zjistit, zda jsou vybrané jednoduché modely dostatečně kvalitní pro využití v oblasti syntézy akustických signálů perkusních nástrojů. Vybranými nástroji byly: metalofon, xylofon, rámový buben (konkrétně bodhran), činely a zvony.

Metalofon i xylofon je možné simulovat poměrně úspěšně. Základní frekvenci zvoleného tónu lze nastavit snadno a přesně, vyšší frekvence obsažené signálem, jejichž přesná hodnota není zcela klíčová, se při troše snahy velmi blíží požadovaným hodnotám. Rovněž v případě bubnů s membránou je základem úspěchu syntézy přesné nastavení základní frekvence. Na proti tomu akustické signály činelů a zvonů obsahují vysoké počty přítomných frekvencí, často působí až dojmem šumu. I tento typ signálů lze ovšem prostřednictvím aplikace úspěšně generovat a dosáhnout tak poměrně dobrých výsledků syntézy, především pak u zvonů. Pochopitelně je však stále nutné mít na paměti, že zvuky jsou pouze uměle vytvořené a nelze očekávat, že by byly zcela k nerozeznání od přirozených zvuků hudebních nástrojů.

Závěry testování vybraných modelů lze shrnout následovně. Vhodným nastavením všech parametrů je možné dosáhnout podmínek, za kterých všechny použité modely svými vibracemi produkují akustické signály, jenž se do značné míry shodují s jejich předlohou v podobě nahrávky reálného hudebního nástroje. Vybrané modely těles hudebních nástrojů lze považovat, přes jejich relativní jednoduchost, za vhodné pro využití v oblasti syntézy zvuků perkusních hudebních nástrojů.

Výsledkem testování je také odhalení silných a slabých stránek virtuální akustické syntézy ve spojení s metodou konečných diferencí v časové oblasti, potažmo aplikace, která je na využití těchto prostředků založena. Za výhodu je považována

široká paleta způsobů ovlivňování výsledné podoby akustického signálu, tím spíše, že vliv jednotlivých parametrů na výsledný signál je zpravidla v souladu s běžným chápáním fyziky okolního světa. Pozitivně je přijímána také skutečnost, že fyzikální modelování není omezeno pouze na jeden typ hudebních nástrojů. Modelovat je možné prakticky cokoliv, co je matematicky popsáno. Existují přitom různě kvalitní a složité modely, které lze dále vylepšovat a rozšiřovat.

Nejvýznamnějším faktorem, omezujícím rozšíření použité metody, je její výpočetní náročnost. Negativně působí také jistá omezení plynoucí z nutnosti zabezpečení numerické stability rovnic. Přestože je velké množství parametrů označeno za výhodu, činí obsluhu aplikace relativně náročnou a na uživatele klade jisté nároky na vědomosti o používaném softwaru. Očekávaným zklamáním je dále nepřítomnost šumu na začátku signálu, způsobeného úderem do tělesa hudebního nástroje. Díky tomu je prakticky nemožné simulovat celou řadu perkusních nástrojů, i když aplikace obsahuje jednoduchý doplněk jako nástroj pro navázání šumu na signál.

Aplikace je zcela funkční a nabízí široké možnosti syntézy, ovšem stále existuje prostor pro její další vývoj. Jako nejprínosnější se jeví rozšíření aplikace o trojrozměrné modely a systém řešící nedostatek spočívající v nesimulování šumu na začátku signálu, způsobeného úderem samotným.

Využití naprogramovaného aplikačního softwaru lze spatřit především v oblasti syntézy zvuků perkusních nástrojů, například v rámci předmětů vyučovaných na FEL ČVUT v Praze, které se přímo zabývají zpracováním akustických signálů v prostředí Matlab. Aplikace může dále sloužit jako zdroj originálních zvuků využitých v jiných aplikacích. Vzhledem k propracovanému způsobu zobrazování vibrací těles by uplatnění pravděpodobně našla také při výkladu vybraných partií fyziky a matematiky, případně jako praktická ukázka využití metody konečných diferencí v časové oblasti.

## Reference

- [1] Syntezátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 5. 12. 2013 v 10:50 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Syntezátor>
- [2] TROSZOK, Daniel. Zvuková syntéza. In: *muzikus.cz: HU-DEBNÍ PORTÁL* [online]. 24.1.2013 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Zvukova-synteza-tema-mesice~24~leden~2013/>
- [3] SCHOUWEILER, Susannah. Photo 4 – Telharmonium Version 2. In: *KNIGHT ARTS: WITNESSING THE TRANSFORMATIONAL POWER OF THE ARTS* [online]. April 3, 2013 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.knightarts.org/community/stpaul/zeitgeist-celebrates-the-pioneers-of-electronic-music/attachment/photo-4-telharmonium-version-2>
- [4] Metody zvukové syntézy: Jak vytvořit zvuk?. In: *OLD-SCHOOL ELECTRONIC MUSIC* [online]. Telotone, 2009, 19.5.2013 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy/>
- [5] KOTEK, Miroslav. *Bicí nástroje*. 1. vyd. Praha: Panton, 1983, 262 s., 64 s. obr. příl.
- [6] Sachs-Hornbostelova klasifikace hudebních nástrojů. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 8. 3. 2013 v 23:13 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Sachs-Hornbostelova\\_klasifikace\\_hudebnich\\_nastroju](http://cs.wikipedia.org/wiki/Sachs-Hornbostelova_klasifikace_hudebnich_nastroju)
- [7] Xylophone (Balo), Sierra Leone (West Africa), ca. 1900. In: *National Music Museum* [online]. The University of South Dakota, © 2006-2010, October 5, 2010 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://orgs.usd.edu/nmm/Africa/2440/AfricanXylophone.html>
- [8] Frame Drum [Dakota, Siouan Family] (89.4.560ab): Wood, various materials; D. 3 1/2 in. (9 cm), L. 18 3/4 in. (47.5 cm). In: *The Metropolitan Museum of Art: Heilbrunn Timeline of Art History* [online]. New York: The Metropolitan Museum of Art, 2000 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/89.4.560ab>
- [9] Rychlost fázová. In: *ALDEBARAN* [online]. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, [2000] [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=671>

- [10] Grupová rychlost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 22. 9. 2013 v 22:02 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Grupová\\_rychlost](http://cs.wikipedia.org/wiki/Grupová_rychlost)
- [11] BILBAO, Stefan. *Numerical sound synthesis: finite difference schemes and simulation in musical acoustics*. Chichester: Wiley, 2009, xiii, 441 s. ISBN 978-0-470-51046-9.
- [12] Wave equation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 18 April 2014 at 16:04 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_equation)
- [13] FLETCHER, Neville Horner; ROSSING, Thomas D. *The physics of musical instruments*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. ISBN 0-387-98374-0.
- [14] Euler-Bernoulli beam theory. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11 April 2014 at 09:07 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Euler-Bernoulli\\_beam\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Euler-Bernoulli_beam_theory)
- [15] Kirchhoff-Love plate theory. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 26 March 2014 at 01:19 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff-Love\\_plate\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff-Love_plate_theory)
- [16] Stress functions. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 25. 2. 2014 v 16:11 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Stress\\_functions](http://en.wikipedia.org/wiki/Stress_functions)
- [17] Dynamika vázaných soustav těles. ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY. *Mechanika těles - Dynamika* [online]. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2005, 1. prosince 2005 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: [http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/kapitola\\_5.html](http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/kapitola_5.html)
- [18] CHAIGNE, Antoine a DOUTAUT, Vincent. Numerical simulations of xylophones. I. Time domain modeling of the vibrating bars. *Journal of the Acoustical Society of America*, 101(1):539-557, 1997.
- [19] RHAOUTI, Leila, CHAIGNE, Antoine a JOLY Patrick. Time-domain modeling and numerical simulation of a kettledrum. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(6):3545-3562, 1999.
- [20] ŠPELDA, Antonín. *Hudební akustika*. 1. Vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1978, © Antonín Špelda

- [21] ČMEJLA, Roman a SOVKA Pavel. *Úvod do číslicového zpracování signálů: Cvičení*. Dotisk prvního vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, prosinec 2006, © Roman Čmejla, Pavel Sovka, 2005. ISBN 80-01-03158-6
- [22] *Freesound* [online]. 2005 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.freesound.org/>
- [23] Sabian AAX Metal Crash Cymbal Brilliant. In: *Music123: your life. your music. your gear.* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.music123.com/drums-percussion/sabian-aax-metal-crash-cymbal-brilliant>
- [24] CHYTIL, Jiří a LEHOCKÝ Zdeněk. Vývojové diagramy - 1. díl. In: *Programujte.com* [online]. 24.7.2005. Webtea.cz: Programujte.com, © 2003-2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://programujte.com/clanek/2005080105-vyvojove-diagramy-1-dil/>

## Obsah příloženého CD

- Adresář Aplikace;  
Kompletní kód aplikace v jazyku Matlab rozdělený do jednotlivých funkcí
- Adresář Zvuky\1 Možnosti aplikace;  
Kapitola 4.1 Možnosti aplikace dokládá uvedené vlastnosti převážně prostřednictvím obrázků se spektrogramy, většina z nich je v přílohách práce. Spektrogramy jsou doplněny tabulkami s nastavením parametrů při dosažení uvedených zvuků. Veškeré zvuky jsou zaznamenány ve formátu WAV a umístěny do jednotlivých složek pojmenovaných shodně s příslušnými tabulkami
- Adresář Zvuky\2 Porovnání s reálnými nástroji;  
Složky zde obsažené nesou jména hudebních nástrojů a jejich obsahem jsou jak nahrávky reálných nástrojů, tak zvuky napodobující nástroje vytvořené aplikací ve formátu WAV
- Adresář Zvuky\3 Nové zvuky;  
Soubory s různými zvuky vyprodukovanými pomocí aplikace, formát WAV
- Soubor DP\_Martin\_SVAB.pdf;  
Diplomová práce ve formátu PDF
- Soubor readme.txt.  
Popis CD

## Seznam příloh

Různé typy rovnic - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé typy úderu (zdroj: vlastní)  
Různé typy úderu - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá šířka úderu (zdroj: vlastní)  
Různá šířka úderu - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá místa středu úderu (zdroj: vlastní)  
Různá místa středu úderu - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá tuhost paličky (zdroj: vlastní)  
Různá tuhost paličky - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé způsoby uchycení tyče (zdroj: vlastní)  
Různé způsoby uchycení tyče - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé způsoby uchycení plochy (zdroj: vlastní)  
Různé způsoby uchycení plochy - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá místa snímání výstupního signálu (zdroj: vlastní)  
Různá místa snímání výstupního signálu - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé hodnoty parametru Theta (zdroj: vlastní)  
Různé hodnoty parametru Theta - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé podélné průřezy tyče (zdroj: vlastní)  
Různé podélné průřezy tyče - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá míra nelinearity (rychlosti úderu) (zdroj: vlastní)  
Různá míra nelinearity (rychlosti úderu) - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různý počet aproximačních uzlů (zdroj: vlastní)  
Různý počet aproximačních uzlů - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé průřezy tyče (zdroj: vlastní)  
Různé průřezy tyče - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé typy materiálů tyče (zdroj: vlastní)  
Zvláštní typy materiálů tyče (zdroj: vlastní)  
Různé typy materiálů tyče - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá napětí membrány (zdroj: vlastní)  
Různá napětí membrány - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé poměry stran plochy (zdroj: vlastní)  
Různé poměry stran plochy - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různá velikost dutiny - nastavení (zdroj: vlastní)  
Různé souřadné soustavy (zdroj: vlastní)  
Různé souřadné soustavy - nastavení (zdroj: vlastní)  
Metalofon, tón C2 - nastavení (zdroj: vlastní)  
Xylofon, tón C2 - nastavení (zdroj: vlastní)  
Bodhran, běžný úder - nastavení (zdroj: vlastní)  
Činel - nastavení (zdroj: vlastní)  
Zvon - nastavení (zdroj: vlastní)  
Značky použité ve vývojových diagramech (zdroj: dostupné z [24])

# Přílohy

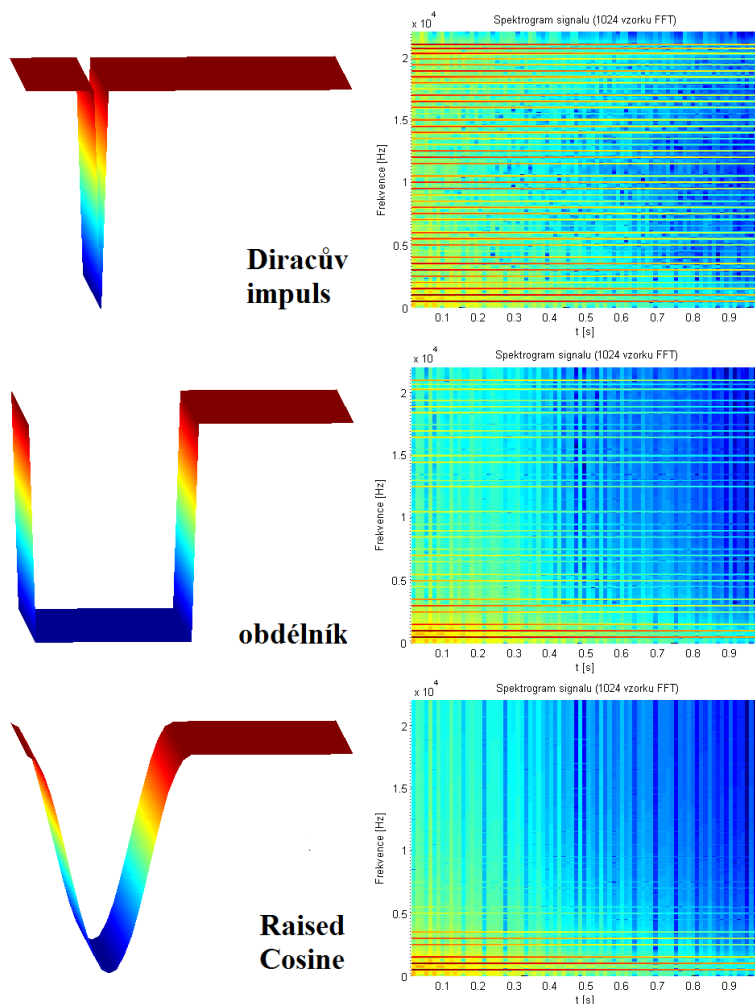
## Různé typy rovnic

Tabulka 2. Různé typy rovnic - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
<i>Typ rovnice</i>	1) vlnová rovnice 2) rovnice pro tuhé těleso
Tvar průřezu	obdélník
Materiál	ocel
Délka	15 cm
Výška	0.5 cm
Šířka	1 cm
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	1) 137 2) 9



## Různé typy úderu

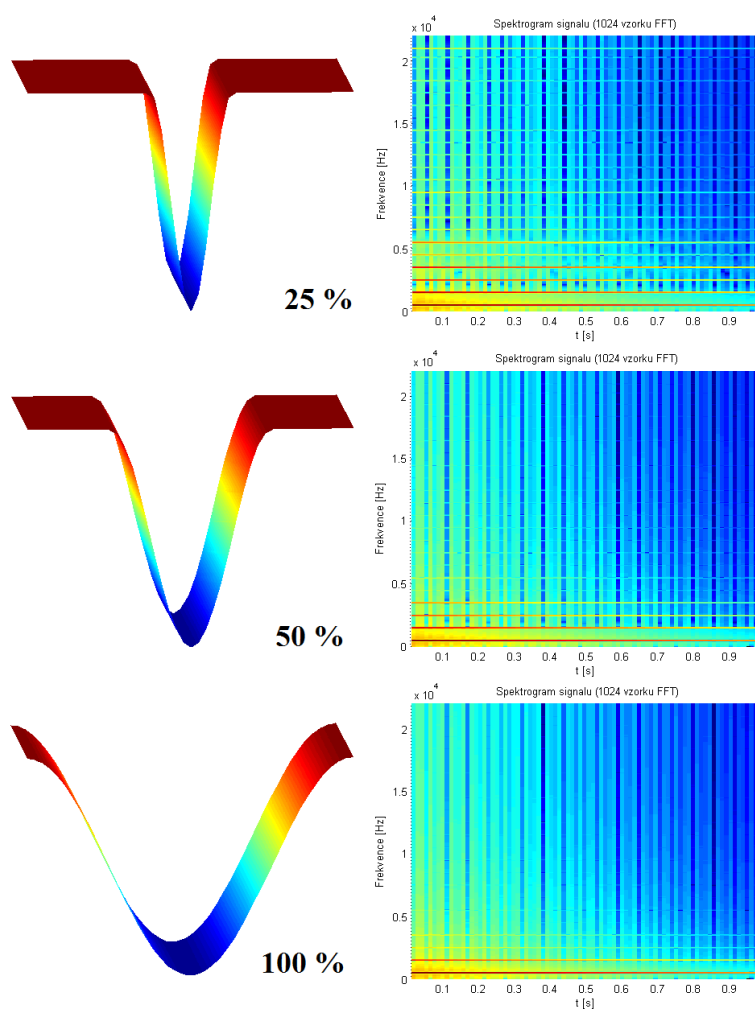


Obrázek 19. Různé typy úderu (zdroj: vlastní)

Tabulka 3. Různé typy úderu - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
<i>Tvar úderu</i>	1) Diracův impuls 2) Raised Cosine 3) obdélník
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	45

## Různá šířka úderu

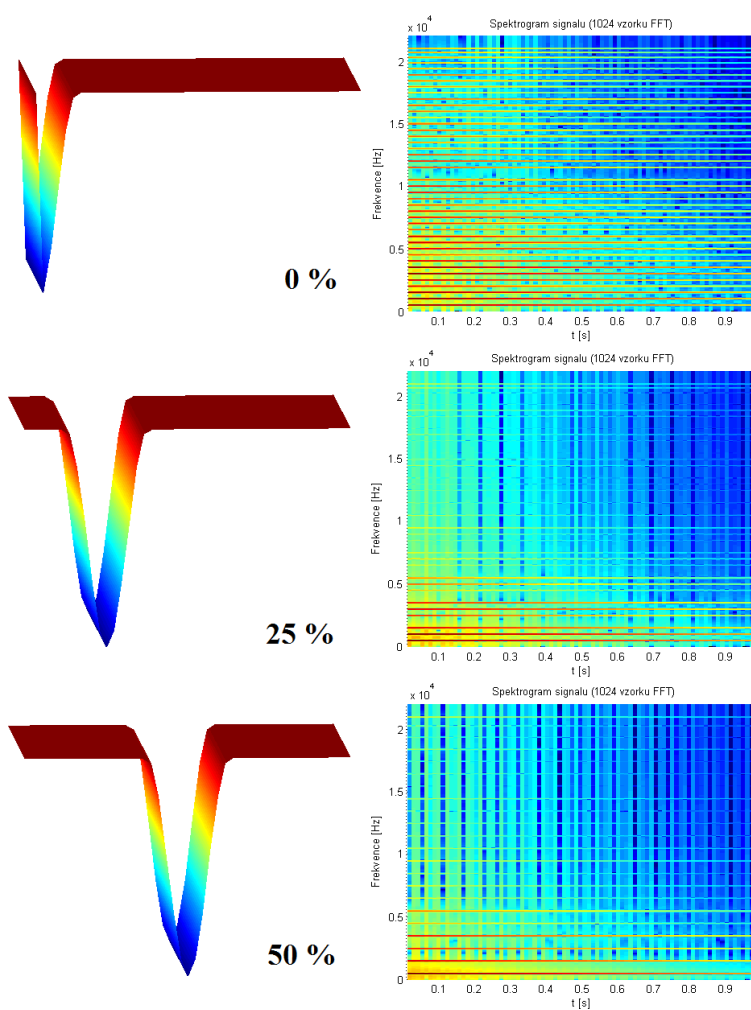


Obrázek 20. Různá šířka úderu (zdroj: vlastní)

Tabulka 4. Různá šířka úderu - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
<i>Rozměr úderu</i>	1) 25 % 2) 50 % 3) 100 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	45

## Různá místa středu úderu



Obrázek 21. Různá místa středu úderu (zdroj: vlastní)

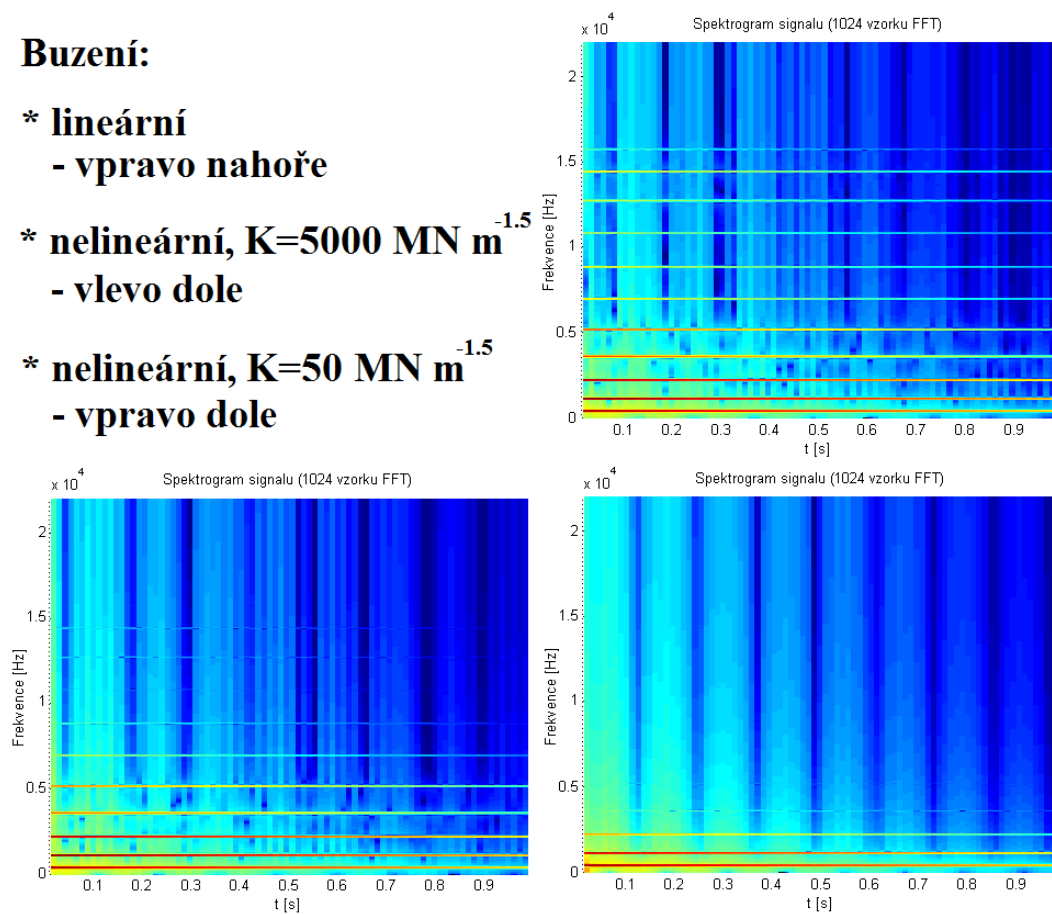
Tabulka 5. Různá místa středu úderu - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
<i>Místo středu úderu</i>	1) 0 % 2) 25 % 3) 50 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	45

## Různá tuhost paličky

### Buzení:

- \* lineární  
- vpravo nahoře
- \* nelineární,  $K=5000 \text{ MN m}^{-1.5}$   
- vlevo dole
- \* nelineární,  $K=50 \text{ MN m}^{-1.5}$   
- vpravo dole



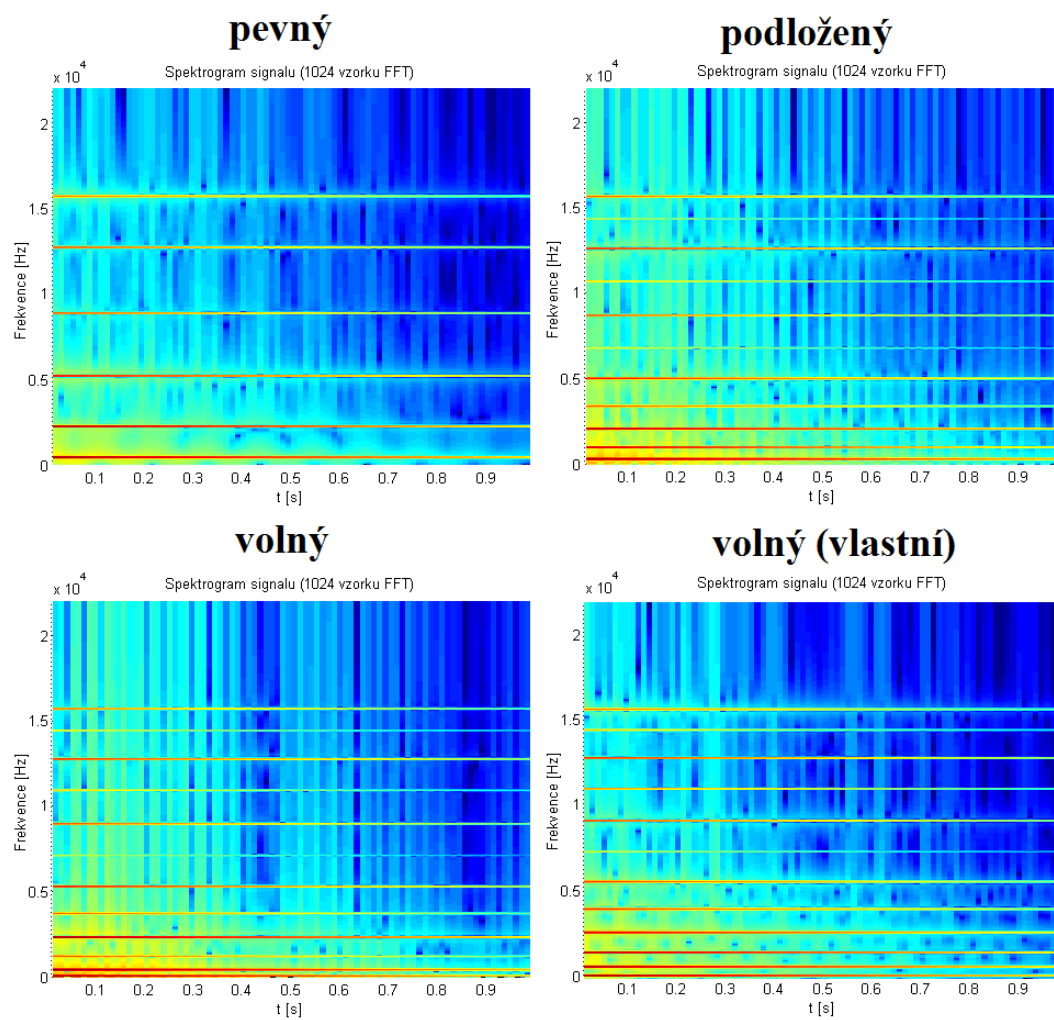
Obrázek 22. Různá tuhost paličky (zdroj: vlastní)

Tabulka 6. Různá tuhost paličky - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Tvar průřezu	obdélník
Materiál	ocel
Délka	22.8 cm
Výška	0.5 cm
Šířka	1 cm
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
<i>Typ úderu</i>	1) lineární 2) nelineární 3) nelineární
<i>Tuhost paličky</i>	2) 5 000 MN m <sup>-1.5</sup> 3) 50 MN m <sup>-1.5</sup>
Hmotnost paličky	25 g
Koeficient tuhosti	1.5
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	13



## Různé způsoby uchycení tyče



Obrázek 23. Různé způsoby uchycení tyče (zdroj: vlastní)

Tabulka 7. Různé způsoby uchycení tyče - nastavení (zdroj: vlastní)

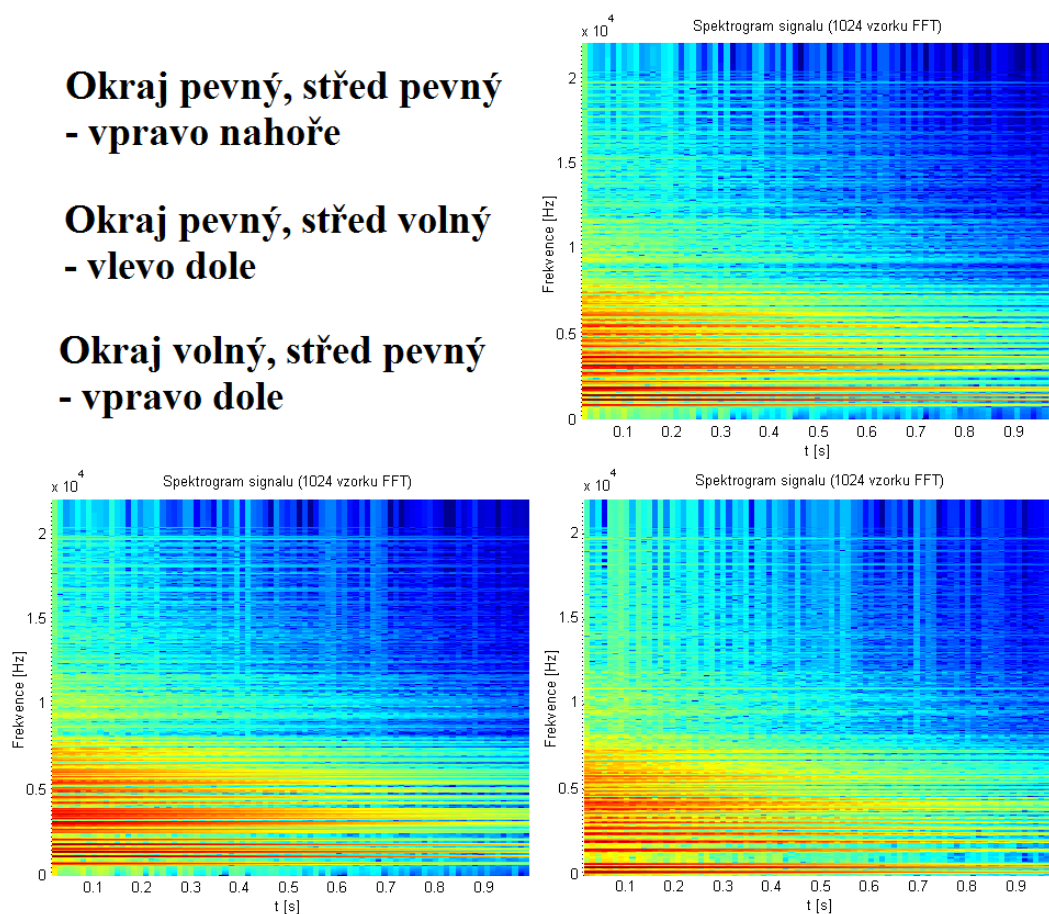
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Hlavní parametr ( $\kappa$ )	140
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	50 %
Levý okraj	pevný
<i>Pravý okraj</i>	1) pevný 2) podložený 3) volný 4) volný (vlastní)
1. bod uchycení	zcela vlevo
2. bod uchycení	zcela vlevo
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	45

## Různé způsoby uchycení plochy

**Okraj pevný, střed pevný  
- vpravo nahoře**

**Okraj pevný, střed volný  
- vlevo dole**

**Okraj volný, střed pevný  
- vpravo dole**



Obrázek 24. Různé způsoby uchycení plochy (zdroj: vlastní)

Tabulka 8. Různé způsoby uchycení plochy - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	obdélník
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Poměr stran	1
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	X = 25 % Y = 25 %
<i>Okraj</i>	1) pevný 2) pevný 3) volný
<i>Střed</i>	1) pevný 2) volný 3) pevný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	X = 25 % Y = 25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	32 x 32

## Různá místa snímání výstupního signálu

**Souřadnice X=6 %, Y=6 %**

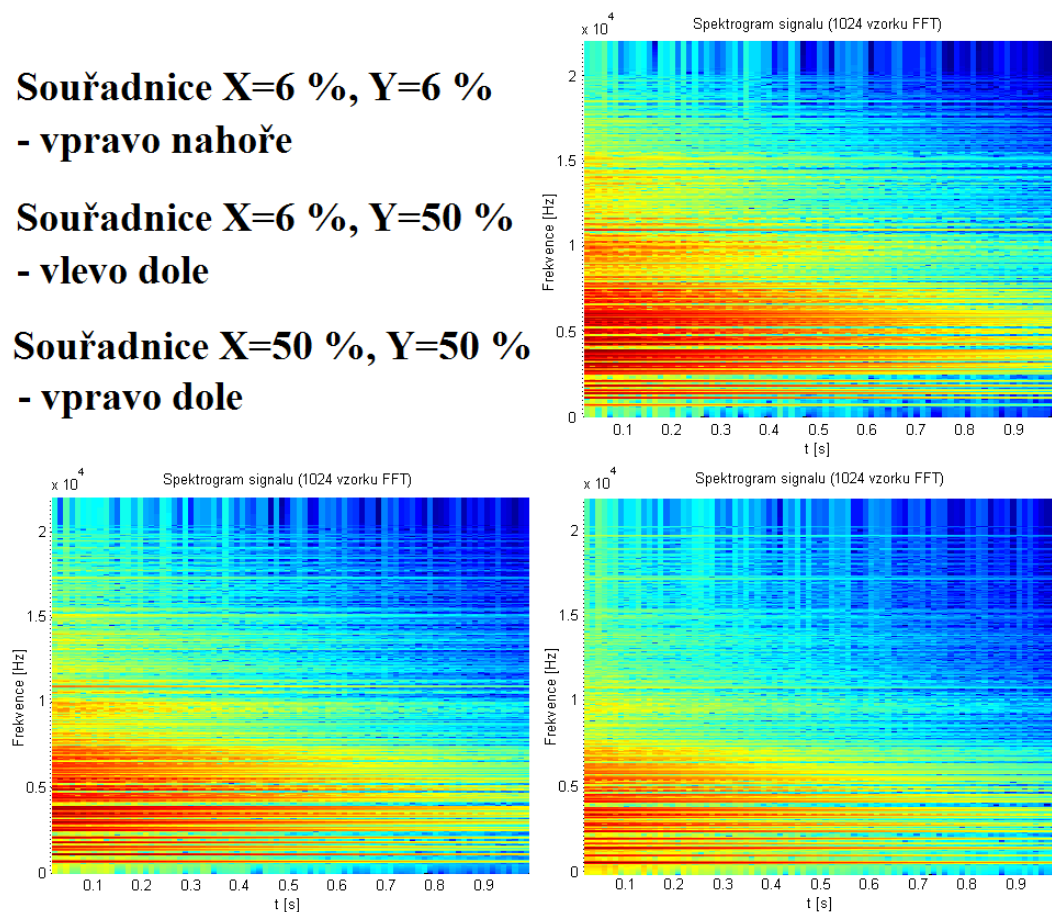
**- vpravo nahoře**

**Souřadnice X=6 %, Y=50 %**

**- vlevo dole**

**Souřadnice X=50 %, Y=50 %**

**- vpravo dole**

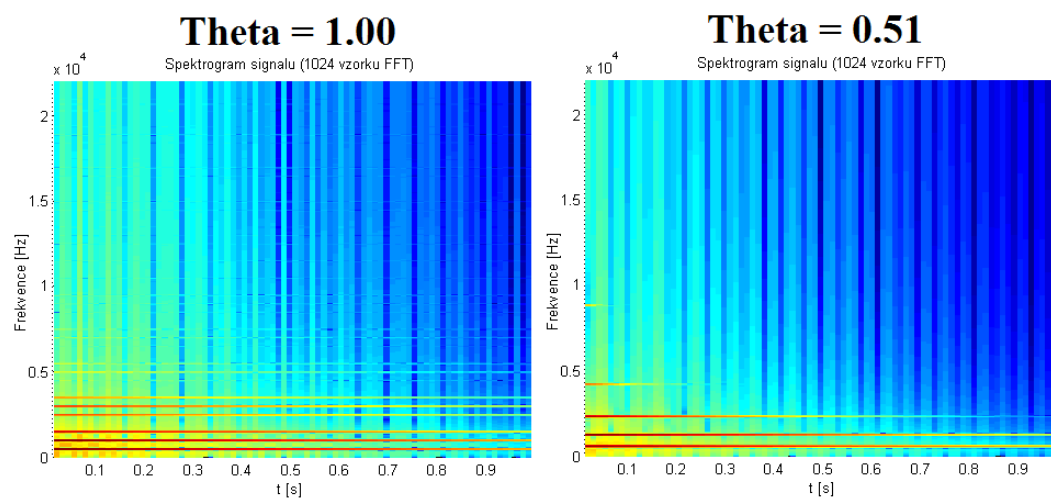


Obrázek 25. Různá místa snímání výstupního signálu (zdroj: vlastní)

Tabulka 9. Různá místa snímání výstupního signálu - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	obdélník
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Poměr stran	1
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	X = 25 % Y = 25 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
<i>Místo snímání</i>	1) X = 6 % Y = 6 % 2) X = 6 % Y = 50 % 3) X = 50 % Y = 50 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	32 x 32

## Různé hodnoty parametru Theta



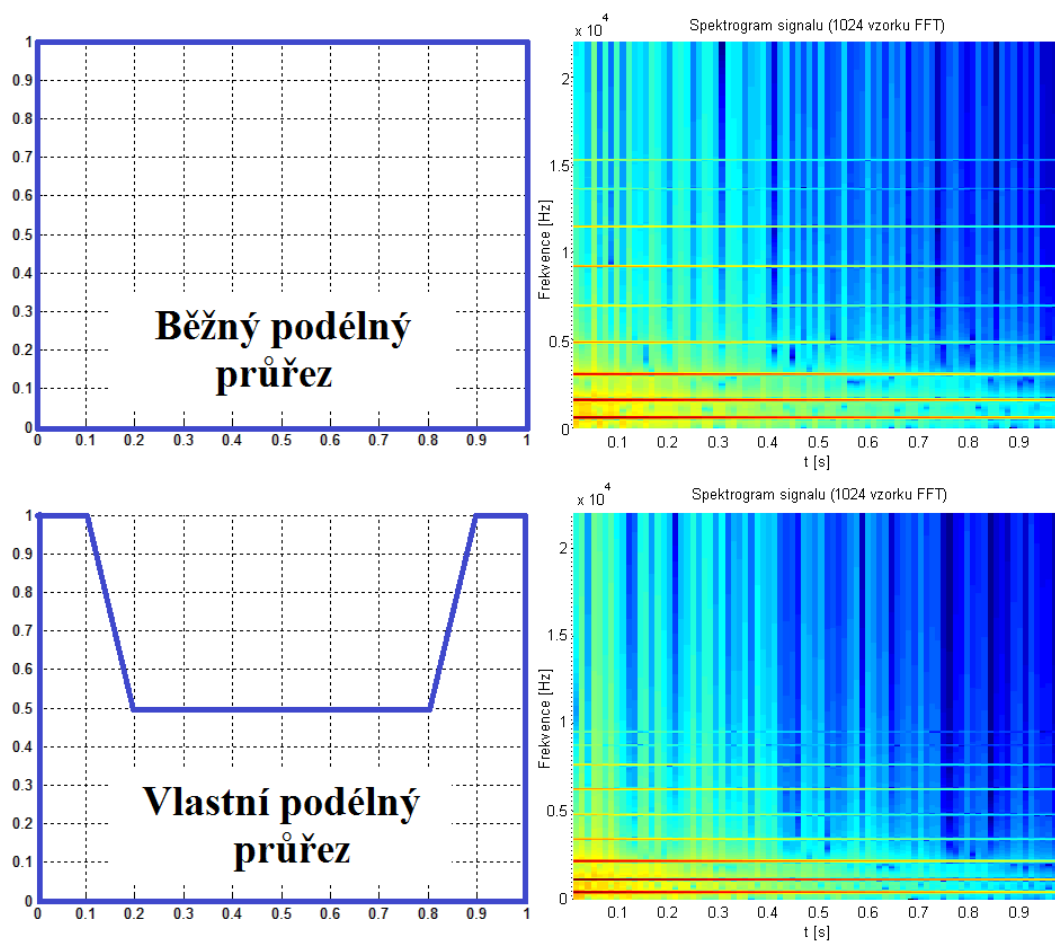
Obrázek 26. Různé hodnoty parametru Theta (zdroj: vlastní)

Tabulka 10. Různé hodnoty parametru Theta - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	implicitní (matice)
<i>Theta</i>	1) 1.00 2) 0.51
Počet aproxim. uzlů	1) 45 2) 7



## Různé podélné průřezy tyče



Obrázek 27. Různé podélné průřezy tyče (zdroj: vlastní)

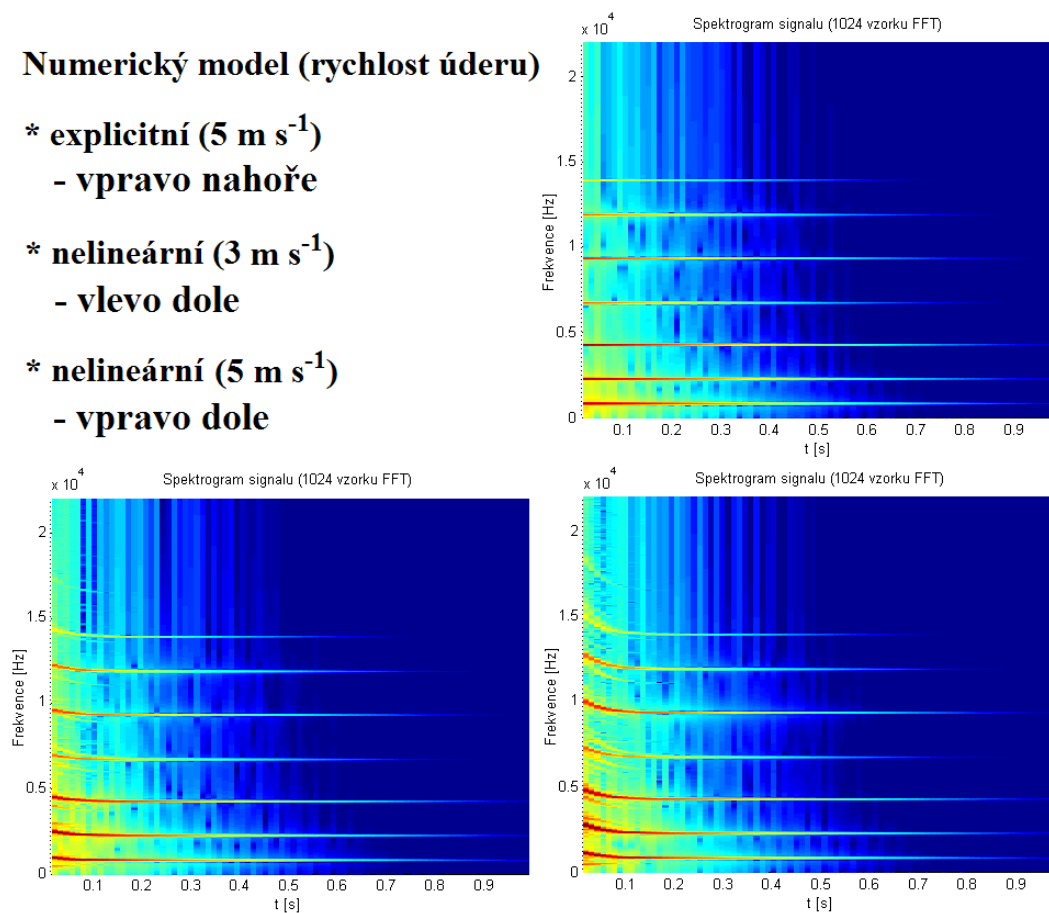
Tabulka 11. Různé podélné průřezy tyče - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Hlavní parametr ( $\kappa$ )	200
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
<i>Numerický model</i>	1) explicitní 2) proměnný průřez
Počet aproxim. uzlů	11

## Různá míra nelinearity (rychlosti úderu)

### Numerický model (rychlost úderu)

- \* explicitní ( $5 \text{ m s}^{-1}$ )  
- vpravo nahoře
- \* nelineární ( $3 \text{ m s}^{-1}$ )  
- vlevo dole
- \* nelineární ( $5 \text{ m s}^{-1}$ )  
- vpravo dole

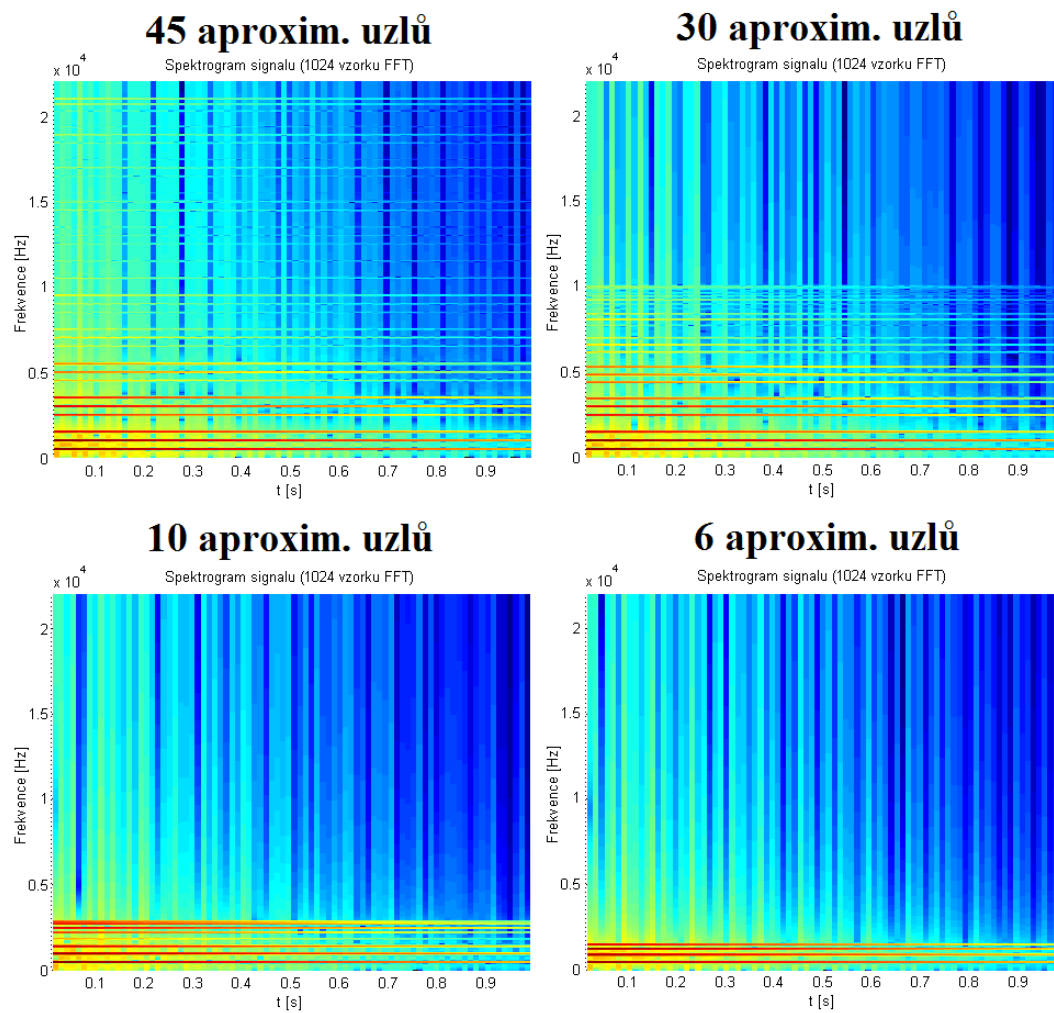


Obrázek 28. Různá míra nelinearity (rychlosti úderu) (zdroj: vlastní)

Tabulka 12. Různá míra nelinearity (rychlosti úderu) - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Tvar průřezu	obdélník
Materiál	ocel
Délka	15.6 cm
Výška	0.5 cm
Šířka	2 cm
<i>Rychlost úderu</i>	1) 5 m s <sup>-1</sup> 2) 3 m s <sup>-1</sup> 3) 5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	1 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
<i>Numerický model</i>	1) explicitní 2) nelineární (matice) 3) nelineární (matice)
Počet aproxim. uzlů	9

## Různý počet aproximačních uzlů

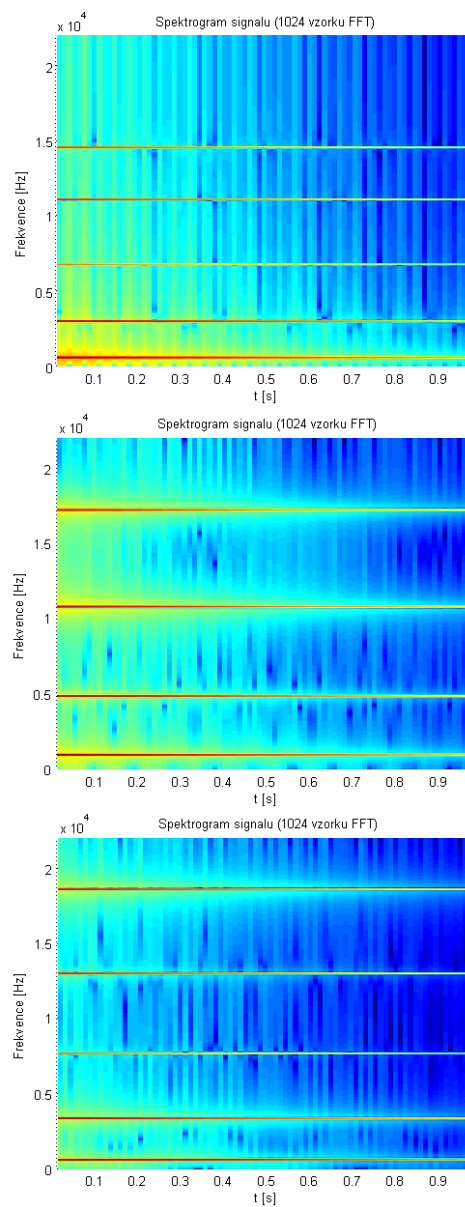
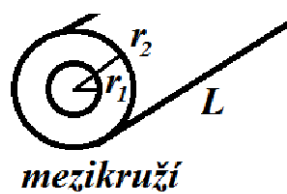
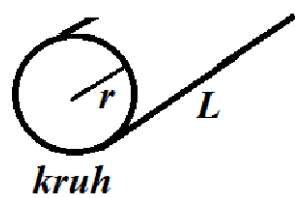
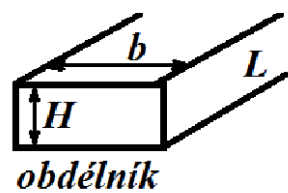


Obrázek 29. Různý počet aproximačních uzlů (zdroj: vlastní)

Tabulka 13. Různý počet aproximačních uzlů - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
<i>Počet aproxim. uzlů</i>	1) 45 2) 30 3) 10 4) 6

## Různé průřezy tyče



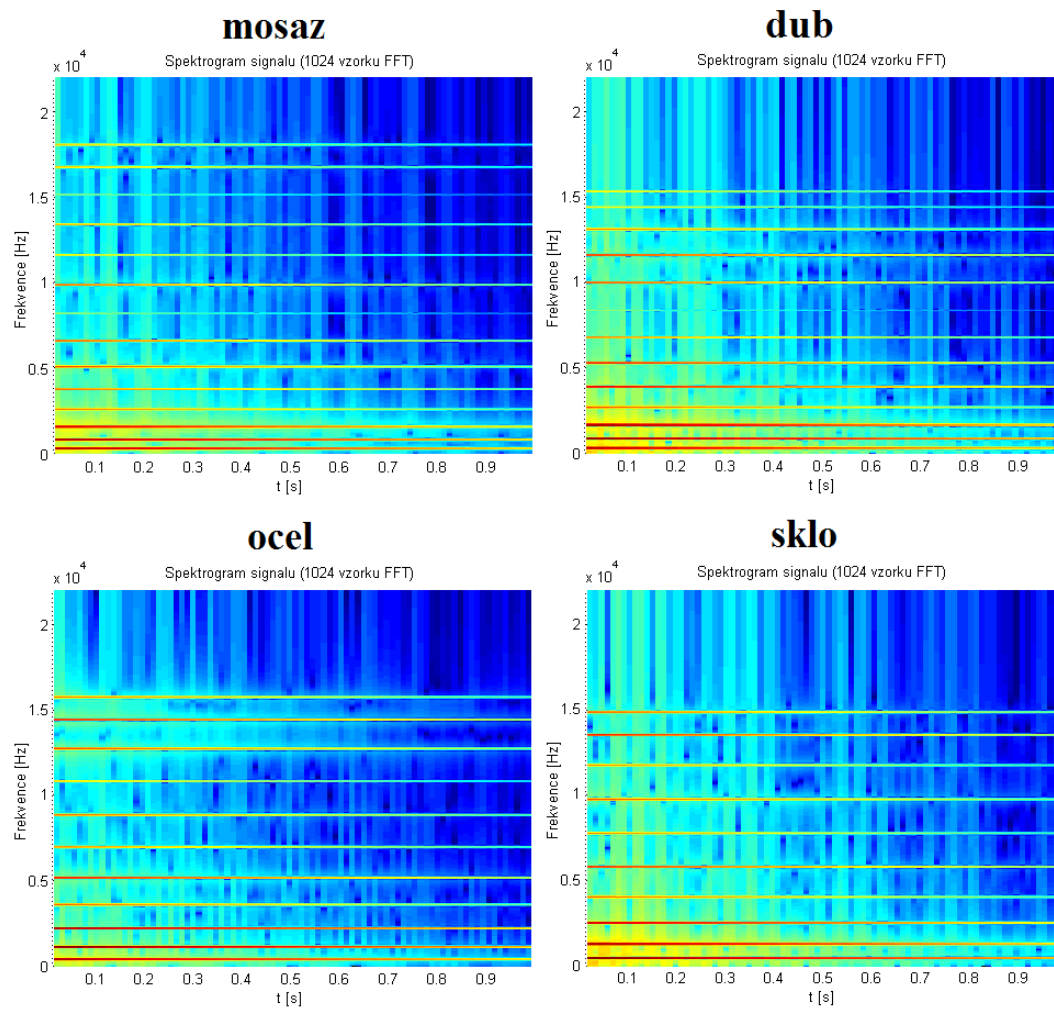
Obrázek 30. Různé průřezy tyče (zdroj: vlastní)

Tabulka 14. Různé průřezy tyče - nastavení (zdroj: vlastní)

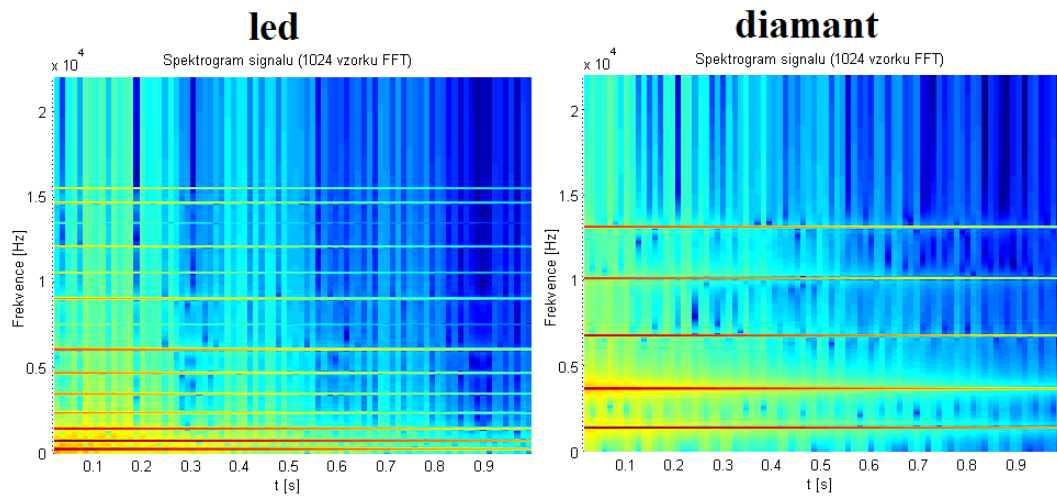
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
<i>Tvar průřezu</i>	1) obdélník 2) kruh 3) mezikruží
1) <i>Výška</i>	1.2 cm
2) <i>Průměr</i>	1.2 cm
3) <i>Poloměr 1</i>	0.6 cm
3) <i>Poloměr 2</i>	0.5 cm
Materiál	ocel
Délka	30 cm
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	50 %
Okraje	pevné
1. bod uchycení	zcela vlevo
2. bod uchycení	zcela vlevo
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	1) 11 2) 9 3) 11



## Různé typy materiálů tyče



Obrázek 31. Různé typy materiálů tyče (zdroj: vlastní)



Obrázek 32. Zvláštní typy materiálů tyče (zdroj: vlastní)

Tabulka 15. Různé typy materiálů tyče - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Tvar průřezu	kruh
<i>Materiál</i>	1) mosaz 2) dub 3) ocel 4) sklo 5) diamant 6) led
Délka	30 cm
Průměr	0.5 cm
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	25 %
Místo středu úderu	25 %
Okraje	pevné
1. bod uchycení	zcela vlevo
2. bod uchycení	zcela vlevo
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	1) 16 2) 15 3) 13 4) 12 5) 4 6) 16

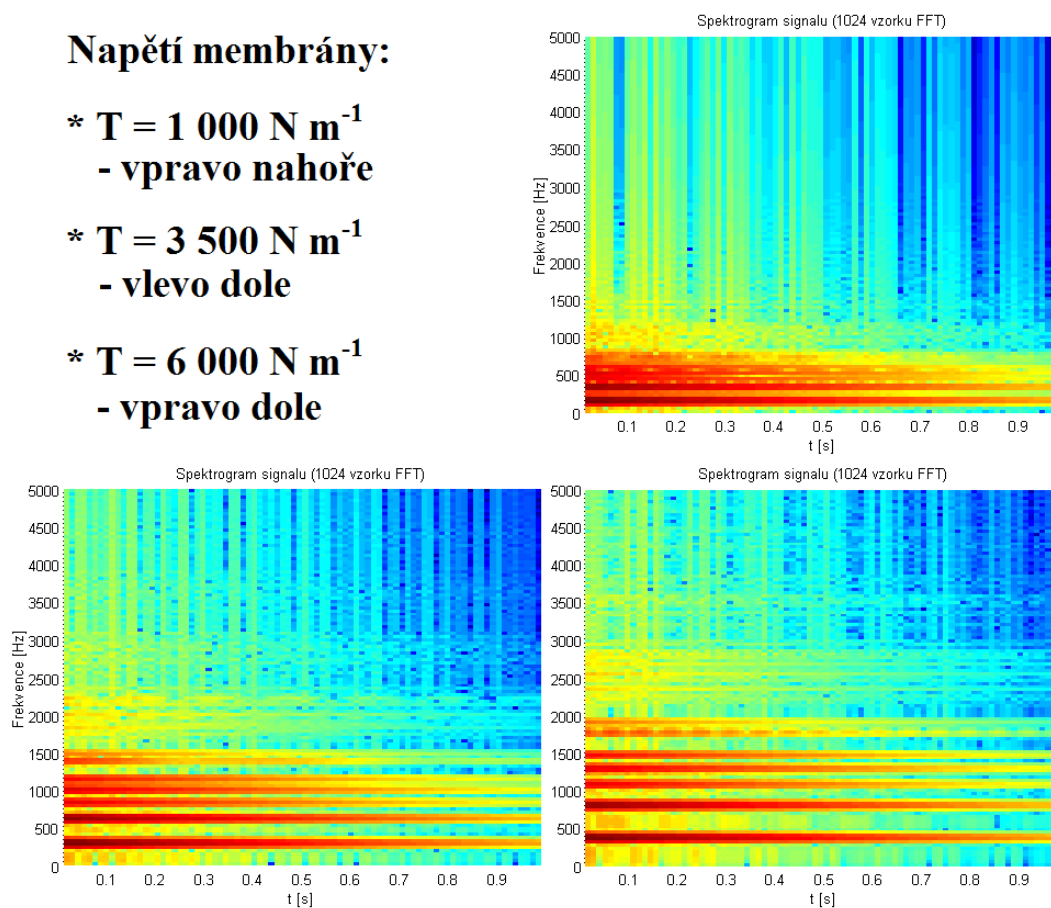
## Různá napětí membrány

### Napětí membrány:

\*  $T = 1\,000\text{ N m}^{-1}$   
- vpravo nahoře

\*  $T = 3\,500\text{ N m}^{-1}$   
- vlevo dole

\*  $T = 6\,000\text{ N m}^{-1}$   
- vpravo dole



Obrázek 33. Různá napětí membrány (zdroj: vlastní)

Tabulka 16. Různá napětí membrány - nastavení (zdroj: vlastní)

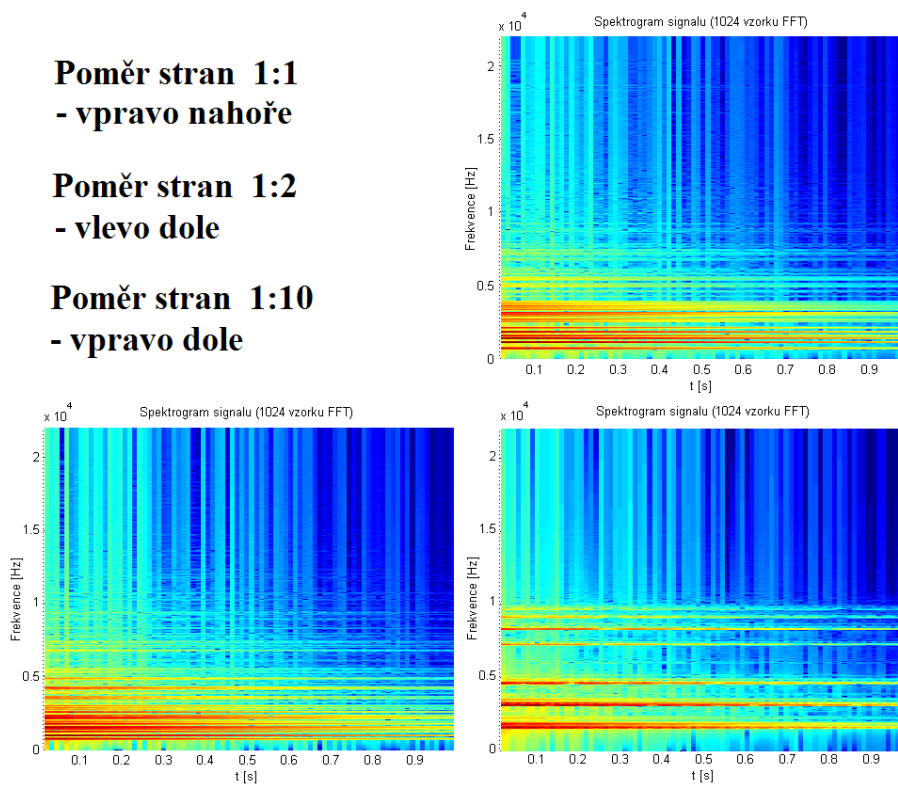
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	obdélník
Délka	30 cm
Šířka	30 cm
<i>Napětí membrány</i>	1) 1 000 N m <sup>-1</sup> 2) 3 500 N m <sup>-1</sup> 1) 6 000 N m <sup>-1</sup>
Plošná hustota	0.262 kg m <sup>-2</sup>
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	X = 50 % Y = 50 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	X = 50 % Y = 50 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	33 x 33

## Různé poměry stran plochy

**Poměr stran 1:1**  
**- vpravo nahoře**

**Poměr stran 1:2**  
**- vlevo dole**

**Poměr stran 1:10**  
**- vpravo dole**



Obrázek 34. Různé poměry stran plochy (zdroj: vlastní)

Tabulka 17. Různé poměry stran plochy - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	obdélník
Hlavní parametr ( $\gamma$ )	1 000
<i>Poměr stran</i>	1) 1.0 (1:1) 2) 0.5 (1:2) 3) 0.1 (1:10)
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	X = 25 % Y = 25 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	X = 25 % Y = 25 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	1) 32 x 32 2) 23 x 44 3) 10 x 91

## Různá velikost dutiny - nastavení

Tabulka 18. Různá velikost dutiny - nastavení (zdroj: vlastní)

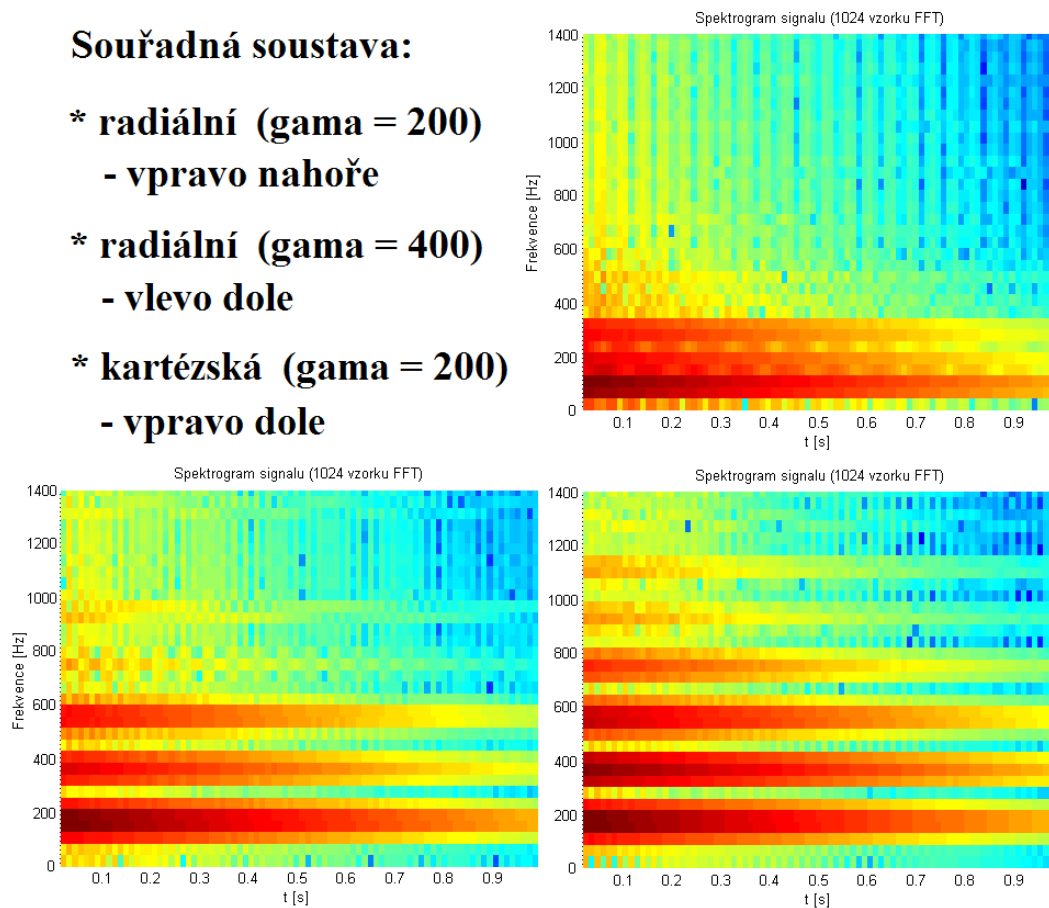
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	obdélník
Délka	30 cm
Šířka	30 cm
Napětí membrány	$2\,500\text{ N m}^{-1}$
Plošná hustota	$0.250\text{ kg m}^{-2}$
<i>Připojená dutina</i>	1) ne 2) ano 3) ano
<i>Objem</i>	1) - 2) $0.021\text{ m}^3$ 3) $0.063\text{ m}^3$
Medium dutiny	vzduch
Rychlost úderu	$5\text{ m s}^{-1}$
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	X = 50 % Y = 50 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	X = 50 % Y = 50 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	33 x 33



## Různé souřadné soustavy

### Souřadná soustava:

- \* **radiální (gama = 200)**  
- vpravo nahore
- \* **radiální (gama = 400)**  
- vlevo dole
- \* **kartézská (gama = 200)**  
- vpravo dole



Obrázek 35. Různé souřadné soustavy (zdroj: vlastní)

Tabulka 19. Různé souřadné soustavy - nastavení (zdroj: vlastní)

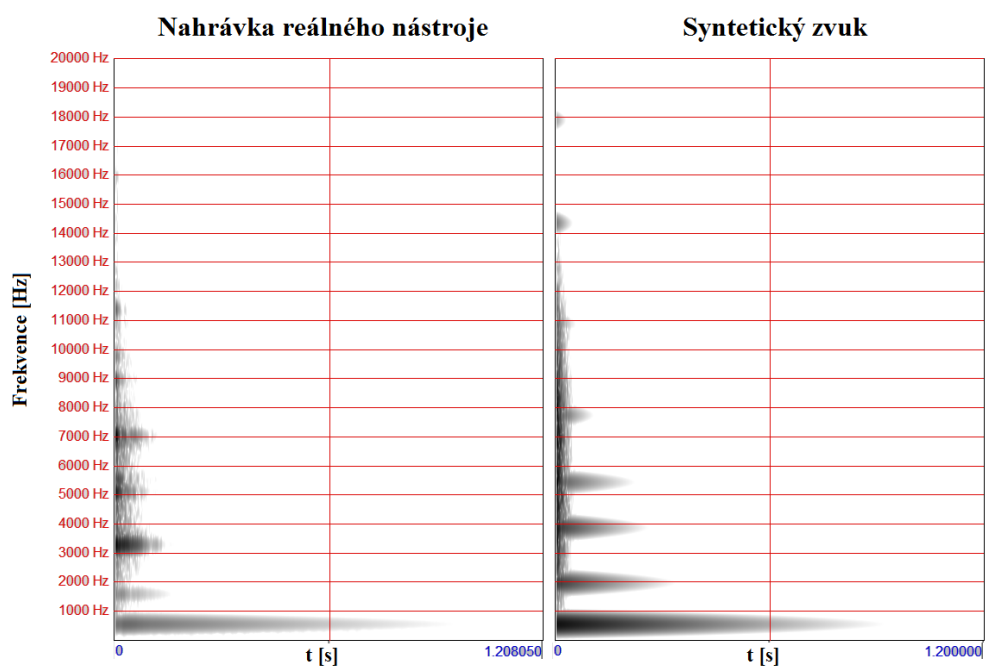
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
<i>Souřadná soustava</i>	1) radiální 2) radiální 3) kartézská
Tvar	1) kruh 2) kruh 3) elipsa
<i>Hlavní parametr (<math>\gamma</math>)</i>	1) 200 2) 400 3) 200
Poměr stran	3) 1
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	50 %
Místo středu úderu	X = 50 % Y = 50 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání	X = 50 % Y = 50 %
Doba trvání signálu	1 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	33 x 33

## Metalofon

Tabulka 20. Metalofon, tón C2 - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Hlavní parametr	240
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	100 %
Místo středu úderu	51.28 %
Okraje	volné
1. bod uchycení	22.4 %
2. bod uchycení	77.6 %
Typ útlumu	frekvenčně závislý útlum
Frekvence 1	500 Hz
Doba dozvuku frekv 1	4 s
Frekvence 2	10 000 Hz
Doba dozvuku frekv 1	1 s
Místo snímání výstupního signálu	51.28 %
Doba trvání signálu	2.4 s
Vzorkovací frekvence	176 400 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	20

## Xylofon



Obrázek 36. Xylofon, tón C2 (zdroj: vlastní)

Tabulka 21. Xylofon, tón C2 - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	1D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Hlavní parametr	240
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	100 %
Místo středu úderu	51.28 %
Okraje	volné
1. bod uchycení	22.4 %
2. bod uchycení	77.6 %
Typ útlumu	frekvenčně závislý útlum
Frekvence 1	500 Hz
Doba dozvuku frekv 1	2 s
Frekvence 2	10 000 Hz
Doba dozvuku frekv 1	0.2 s
Místo snímání výstupního signálu	51.28 %
Doba trvání signálu	1.2 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	10

## Bodhran

Tabulka 22. Bodhran, běžný úder - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	vlnová rovnice
Souřadná soustava	radiální
Tvar	kruh
Hlavní parametr	430
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Raised Cosine
Typ úderu	lineární
Rozměr úderu	100 %
Místo středu úderu	X = 43.05 % Y = 43.05 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
Doba dozvuku	3 s
Místo snímání výstupního signálu	Poloměr = 0 % Úhel = 53.85 %
Doba trvání signálu	2 s
Vzorkovací frekvence	44 100 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	Poloměr = 3 Úhel = 5

## Činel

Tabulka 23. Činel - nastavení (zdroj: vlastní)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Rozměr	2D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	elipsa
<i>Hlavní parametr</i>	1) 10 2) 30 3) 50 4) 70 5) 140
Poměr stran	1
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Diracův impuls
Typ úderu	lineární
Místo středu úderu	X = 62.79 % Y = 25.15 %
Okraj	pevný
Střed	pevný
Typ útlumu	útlum amplitudové obálky
<i>Doba dozvuku</i>	A) 0.5 s B) 1.4 s C) 5.0 s
Místo snímání výstupního signálu	X = 72.09 % Y = 24.13 %
<i>Doba trvání signálu</i>	A) 0.2 s B) 0.7 s C) 3.0 s
Vzorkovací frekvence	176 400 Hz
Numerický model	explicitní
Počet aproxim. uzlů	1) 67 x 67 2) 39 x 39 3) 30 x 30 4) 26 x 26 5) 18 x 18

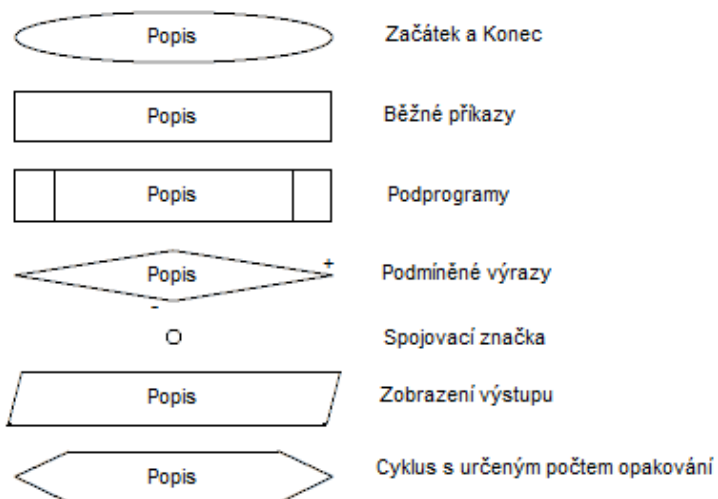
## Zvon

Tabulka 24. Zvon - nastavení (zdroj: vlastní)

Parametr	Hodnota
Rozměr	2D
Typ rovnice	rovnice pro tuhé těleso
Souřadná soustava	kartézská
Tvar	elipsa
<i>Hlavní parametr</i>	1) 10 2) 65
Poměr stran	1
Rychlost úderu	5 m s <sup>-1</sup>
Tvar úderu	Diracův impuls
Typ úderu	lineární
<i>Místo středu úderu</i>	1) X = 30.40 % Y = 21.70 % 2) X = 75.8 % Y = 51.5 %
Okraj	pevný
Střed	volný
Typ útlumu	frekvenčně závislý útlum
<i>Frekvence 1</i>	1) 500 Hz 2) 900 Hz
<i>Doba dozvuku frekv 1</i>	1) 15 s 2) 18 s
<i>Frekvence 2</i>	1) 10 000 Hz 2) 20 000 Hz
Doba dozvuku frekv 2	1 s
<i>Místo snímání výstupního signálu</i>	1) X = 19.60 % Y = 26.10 % 2) X = 36.4 % Y = 45.5 %
Doba trvání signálu	11 s
<i>Vzorkovací frekvence</i>	1) 8 000 Hz 2) 16 000 Hz
Numerický model	explicitní
<i>Počet aproxim. uzlů</i>	1) 15 x 15 2) 8 x 8



## Značky použité ve vývojových diagramech



Obrázek 37. Značky použité ve vývojových diagramech (zdroj: dostupné z [24])