



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Budai Benjámín Marcell

**HAMMOND ORGONA-
SZINTETIZÁTOR
MEGVALÓSÍTÁSA**

KONZULENS

Rucz Péter

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	7
1.1 Motiváció	7
1.2 A dolgozat felépítése	7
2 A Hammond-orgona	9
2.1 A Hammond-orgona története.....	9
2.2 A Hammond-orgona hangkeltése	10
3 Modellalkotás.....	14
3.1 Szintézis módszerek	14
3.1.1 Additív szintézis.....	14
3.1.2 Szubtraktív szintézis.....	14
3.1.3 Hullámtáblás szintézis.....	15
3.1.4 Fizikai alapú szintézis	15
3.2 A Hammond-orgona modellje.....	15
3.3 Percussion modell	18
3.3.1 Lineáris burkoló komponensek	18
3.3.2 Exponenciális burkoló komponensek.....	20
4 A szintetizátor megvalósítása VST környezetben	22
4.1 Virtual Studio Technology	22
4.1.1 MIDI protokoll	23
4.1.2 A plugin és a host program kapcsolata.....	23
4.1.3 Software Development Kit (VST SDK).....	24
4.2 Kiindulás	24
4.3 A VST program felépítése.....	25
4.3.1 Voice	26
4.3.2 Controller	27
4.3.3 Processor	28
4.4 A fejlesztés	28
4.4.1 Harmonikusok	29
4.4.2 Percussion.....	30
4.4.3 Grafikus felület.....	30

5 A Leslie-hangszóró szimulációja	31
5.1 A Leslie-hangszóró	31
5.1.1 A magas sugárzó	32
5.1.2 A mélysugárzó	32
5.1.3 A forgó hangforrás akusztikai hatásai	32
5.2 Leslie szimuláció egyszerű modulációkkal	33
5.2.1 Amplitúdómoduláció	34
5.2.2 Frekvenciamoduláció.....	35
5.3 Leslie szimuláció akusztikai végeelem módszerrel.....	38
5.3.1 Akusztikai végeelem módszer.....	38
5.3.2 Az akusztikai modellezés fejlesztői környezete	40
5.3.3 A hangtér kialakítása	40
5.3.4 A hangtér szimuláció felhasználása	43
5.3.5 Eredmények	44
5.3.6 A szimuláció beépítése a VST plugin-ba.....	49
5.3.7 A szimuláció végleges formája a szintetizátorban.....	50
6 Végeredmény	52
6.1 Értékelés.....	53
6.2 Továbbfejlesztési lehetőségek	53
7 Összegzés.....	54
8 Köszönetnyilvánítás	55
9 Irodalomjegyzék.....	56
9.1 Képek forrásai.....	58
10 Függelék.....	59
10.1 A szintetizátor vezérelhető paraméterei.....	59
10.2 Matlab Kódrészletek	60
10.2.1 Hammond-orgona modell	60
10.2.2 Percussion modell	60
10.2.3 Leslie szimuláció	61

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Budai Benjámín Marcell**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2015. 05. 14.

.....
Budai Benjámín Marcell

Kivonat

A Hammond-orgona a sípos orgonák hangjának szintézise céljából létrehozott billentyűs hangszer, amely a feltalálójától nem várt, egyedülálló hangzásának köszönhetően népszerű hangszerré vált a '60-as évektől kezdődően. Jelenléte a mai napig fellelhető a legkülönbözőbb zenei stílusokban. Az elektromechanikus hangszer hangkeltésének alapját mágneses hangszedők, és speciális fogazattal kialakított fém kerek, úgynevezett hangkerekek szolgáltatják. A hangszedők közelében forgó hangkerekek különböző frekvenciájú szinusz hullámokat generálnak, amellyel a megszólaló hang egy-egy harmonikusát hozzák létre. A Hammond-orgona részét képezi a Leslie-hangszórónak nevezett forgó hangszóróegység is, amely szintén a jellegzetes hangzásért felelős.

A Hammond-orgona egyik jelentős hátránya, hogy mérete és tömege körülményessé teszi a hangszer használatát. A probléma megoldására a hangszintézis fejlődése és a digitális szintetizátorok megjelenése adott lehetőséget, ám az eredeti Hammond-orgona hangzás reprodukálása nehéz feladatnak bizonyult, melyet főként a forgó hangszóró által keltett hatások modellezése tesz bonyolulttá. Ennek oka, hogy a mozgó hangszóró többféleképpen modulálja a lesugárzott hangot, tekintve például a Doppler-effektusból származó frekvenciamodulációt.

A dolgozatomban bemutatok egy VST (Virtual Studio Technology) környezetben fejlesztett valós időben futtatható és vezérelhető virtuális Hammond-orgona szintetizátor megvalósítását. Ez magában foglalja a Hammond-orgona és a Leslie-hangszóró működésének leírását, a hangszer és a forgó hangszóró modellezését, és az ezekre alapozott VST plugin fejlesztésének lépéseit. A dolgozat meghatározó részét teszi ki a forgó hangszóró modellezése, ezen belül is az akusztikai véges elem módszer segítségével létrehozott szimuláció bemutatása.

Abstract

The Hammond organ was created for the synthesis of the sound of pipe organs, and became a popular keyboard instrument, thanks to the unique and unexpected effects present in its sound. The Hammond-organ is used in all styles of music nowadays. The operation of the electro-mechanical instrument is based on magnetic pickups and revolving, specially moulded metal wheels, called tonewheels. The revolving tonewheels generate sinusoid waves at different frequencies, producing the harmonics of the voice. A rotating speaker, the so called Leslie speaker is also part of the Hammond-organ, which is responsible for its characteristic sound to a significant extent.

A remarkable disadvantage of the instrument is its large size and weight, that makes the user unable to transport it. This problem procured the demand for digital Hammond organ synthesisers. Despite the evolution of sound synthesis, reproducing the sound of the Hammond organ remained a great challenge, mainly owing to the effects created by the rotating speaker. One of these effects is the frequency modulation caused by the Doppler effect during the motion of the speaker.

In my thesis, I present the implementation of a real-time, controllable Hammond organ synthesiser plugin. First, I introduce the structure of the Hammond organ and the Leslie speaker. In the following, I create the model of the instrument and the rotating speaker. Finally I implement the VST (Virtual Studio Technology) plugin based on the preceding work. Simulating the rotary speaker by means of the acoustic finite element method and incorporating the results into the plugin is an essential part of the thesis.

1 Bevezetés

1.1 Motiváció

Napjainkban, a zenében, a zenei ipar fejlődésében egyre nagyobb szerepet kap a villamosmérnöki, informatikai tudomány, illetve a digitális technika. A hangszerek modellezésének, a hangkeltés vizsgálatának és a hangszintézisnek számos előnyét élvezzi a stúdiótechnika, a hangszergyártás és a zenész.

A Hammond-orgona azon hangszerek közé tartozik, melynek fizikai adottságai miatt nagy jelentősége van a hangszert modellező digitális szintetizátorok megjelenésének. A Hammond-orgona működéséből adódóan nagy tömeggel és mérettel rendelkezik, továbbá állandó karbantartást igényel, így nem csak maga a hangszer, hanem annak fenntartása, javítása és szállítása is egyaránt költséges, nehézkes.

A téma személyes vonatkozása, hogy billentyűsként egy Hammond-orgona klón használója vagyok. Tapasztalatom, hogy az előzőkben leírt problémák megoldása mellett, a legtöbb „Hammond” hangszin, például egy szintetizált zongorához képest kevésbé reprodukálja a jellegzetes hangszint. Ez felkeltette az érdeklődésemet a hangszermodellezés, annak folyamata, kihívásai iránt.

Dolgozatom célja, hogy bemutassam a hangszintézis folyamatát, a hangszer megismerésétől kezdve, a modellezés és a szoftverfejlesztés lépésein keresztül, egészen egy kész, stúdiószoftverrel kompatibilis, Hammond-orgona hangszint megszólaltató plugin megvalósításáig.

1.2 A dolgozat felépítése

Elsőként bemutatom a Hammond-orgonát. Ez magában foglalja a hangszer történetét, felépítését, működési elvét, továbbá hangjának jellegzetességeit. Ezután fizikai leírást adok a figyelembe veendő hatásokról, majd ezek alapján kiinduló modellt készítek Matlab környezetben. Az így kapott modellt felhasználva megvalósítom a VST szintetizátort, bemutatom a fejlesztés menetét. Ezt követően egészítem ki a munkát a Hammond-orgona szerves részét képező forgó hangszóróval. Szintén modellt készítek a

mozgó hangszóróról, ám ez esetben akusztikai végeelem módszer segítségével. Az így kapott szimulációs eredményeket beépítem a szintetizátorba. Ezután bemutatom és értékelem a végeredményt, összegzem a munkát.

2 A Hammond-orgona

2.1 A Hammond-orgona története

A Hammond-orgona feltalálója Laurens Hammond (1895-1973) amerikai fizikus volt, találmányát 1934-ben szabadalmaztatta. [1] A hangszer alapja Hammond egy korábbi találmánya. Nagyon pontos, csendes szinkronmotort alkotott meg, melyet először kattogástól mentes órák gyártására használt fel. Később jött rá, hogy az egyenletes sebességgel forgó szinkronmotor megfelelő konstrukcióban zenei hang generálására is képes lehet. Első próbálkozásai fuvolához, orgonasíphoz hasonló hangot produkáltak. Így Hammond eredeti célja az volt, hogy olyan orgonát hozzon létre templomok számára, amely olcsóbb, hordozható alternatívát kínál a sípos orgonával szemben. Tehát a Hammond-orgona maga is egy szintézis eredményeként jött létre, megalapozva a hangszermodellezés kialakulását. [2] Hasonló ideológia állt Thadeus Cahill hangszere, a Hammond-orgona elődeként emlegetett Telharmonium mögött is, ám Hammondnak sikerült használható méretű modellt alkotnia. [1]

A hangszer megjelenése és sikere után használata hamar elrugaszkodott az eredeti koncepciótól, hangjának nem tervezett jellegzetességei, sokszínűsége igen kedvelté váltak a zenészek körében. Elterjedését, és igazán egyedi, összetéveszthetetlen hangzását azonban az úgy nevezett „Leslie-hangszórónak”, vagy forgó hangszórónak köszönheti. A Hammond vállalatnál dolgozó Donald J. Leslie túlzottan száraznak, „egyenesnek” tartotta az orgona hangját, hiányolt még valamit. Néhány évvel az orgona megjelenése után megalkotta a később róla elnevezett forgó hangszórót, amely nélkül ma már nehezen képezhető el a Hammond-orgona. [1] A Leslie-hangszóró két forgó hangforrásból álló rendszer, amely a forgó mozgást kísérő Doppler-effektus miatt igen izgalmasan modulálja az orgona hangját. A Leslie-hangszóróval kiegészült Hammond-orgona nagyjából minden műfajban, először főként jazz, blues, majd később a rockzenében és a popzenében is elterjedt, és napjainkig megtalálható a legkülönbözőbb zenei produkciókban. A rockzenében jellegzetessé vált az orgona gitárral analóg módon történő torzítása is.

A '70-es évekig több modell is készült az orgonából, ám ezek érdemben nem különböztek egymástól, néhány kisebb változtatáson, fejlesztésen, kinézetén kívül.

Laurens Hammond halála után a mechanikus működésű orgonák gyártása megszűnt. A '90-es évektől kezdve jelennek meg digitális Hammond-orgona klónok és szoftverek. [1]

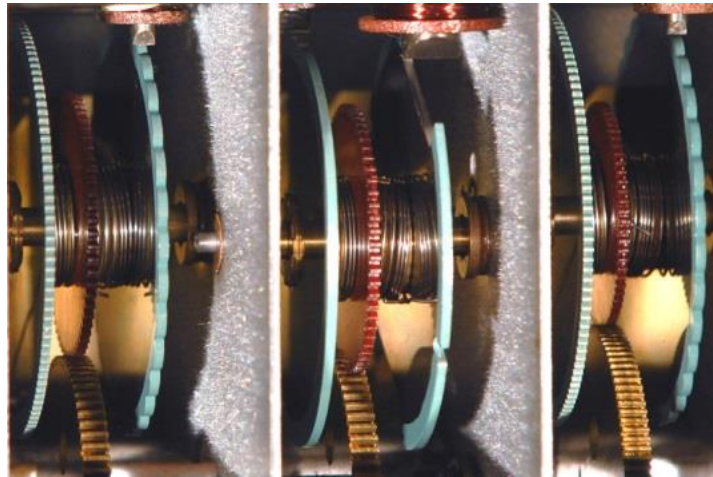


2.1. ábra: Két-manuális Hammond-orgona és Leslie-hangszóró láda [K1]

2.2 A Hammond-orgona hangkeltése

A hangkeltés alapjául egy mágneses hangszedő szolgál, melynek közelében speciálisan kialakított, lekerekített fogazatú fém fogaskerék forog. Ez az úgynevezett „tonewheel”, vagy hangkerék. A forgó kerék szinuszos váltakozó áramot indukál a mágnesben. A szinusz frekvenciáját, tehát a keltett hang hangmagasságát a hangkerék forgási sebessége, és „fogainak” száma határozza meg. Mivel csupán egy kerék által generált tiszta szinusz a felharmonikusok hiányából adódóan nem ad élvezhető zenei hangot, az egy adott hangmagassághoz tartozó hangot több kerék generálja. [2] Hammond úgy ítélte meg, hogy a hang színezetét érdemben meghatározó felharmonikusok közé az első nyolc tartozik, az e feletti elhanyagolhatóak, illetve magasabb tartományban a hallható frekvencián kívül esnek, tehát ezen harmonikusok miatt a hangkerekek számának további növelése nem célszerű. Továbbá ugyanezen okból kifolyólag azokat felharmonikusokat tette megszólaltathatóvá, melyek közel megegyeznek magasabb zenei hangok alapharmonikusaival. Így egy kerék a hozzá tartozó alaphang mellett több másik alaphang valamelyik harmonikusát is képes megszólaltatni. Emiatt például nem szerepel az orgona felhangrendszerében a hetedik

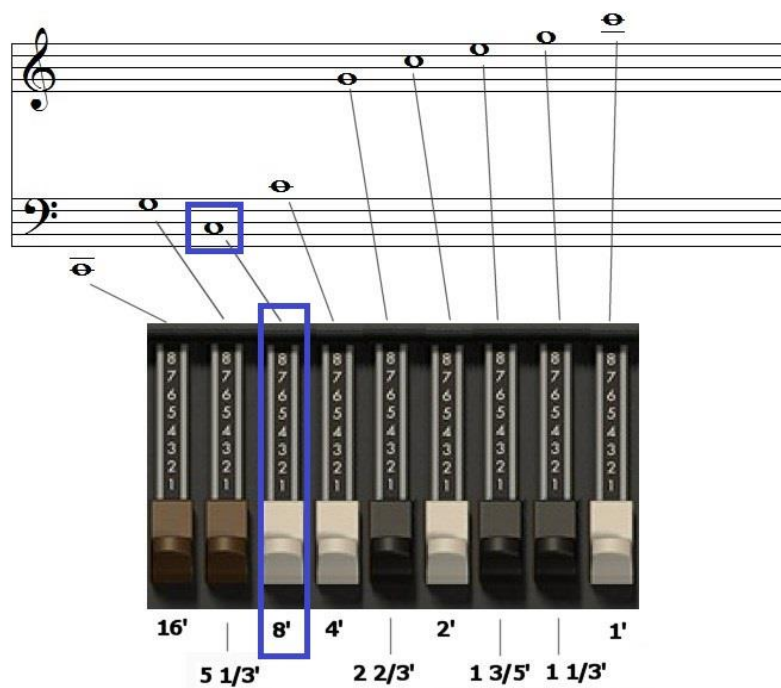
felharmonikus,¹ mert ez újabb hangkerekeket igényelne. Végeredményben az öt oktáv hangterjedelmű hangszer az ezen a tartományon kívül eső harmonikusok figyelembevételével összesen 91 hangkerékből tevődik össze. A különböző sebességgel forgó kerekeket áttételeken keresztül egyetlen szinkronmotor hajtja. A mágneses hangszedőktől az elektromos jel bonyolult kapcsolórendszer és vezetékezés útján kerül a hangszóróba. [3]



2.2. ábra: Hangkerekek (tonewheel) [K2]

Egy hang tehát kilenc harmonikusból (alapharmonikus és nyolc felharmonikusa) tevődik össze melyek amplitúdó arányait manuálisan lehet változtatni az úgynevezett „drawbar”-ok, vagy regiszterek segítségével. Ez a kilenc harmonikus tetszőleges arányú keverését teszi lehetővé. A regiszterekkel tulajdonképpen a hangkerék mágnestől való távolságát állítjuk be. A korábbi modellekben a regiszterekkel nyolc diszkrét amplitúdóérték beállítására volt lehetőség, későbbi fejlesztések során folytonossá tették ezt a skálát. [4] A 2-I táblázat a regiszterek, és az általuk reprezentált harmonikusok adatait ismerteti a C3 hang (130,81 Hz) példáján keresztül. A második oszlop a drawbar-okon található feliratokat ismerteti, ez is a regiszterek egyfajta elnevezése. Az elnevezés a sípos orgonákhoz köthető, ahol egy adott hangmagasságot, regisztert szokás a sípok lábban mért hosszával megadni. [2] A drawbar-okhoz tartozó harmonikusokat továbbá a 2.3. ábra szemlélteti, ahol az alapharmonikust a kék keret jelzi.

¹ Félreértésre adhat okot, hogy az angol nyelvű szakirodalom az alapharmonikust nevezi 1. harmonikusnak, és így tovább, míg magyarul megkülönböztetjük az alapharmonikust, és az x. felharmonikust. Itt és a továbbiakban is az angol terminológiát veszem alapul.



2.3. ábra: Drawbar-ok és a felharmonikusok [K3]

Hang	Drawbar felirat	Angol elnevezés	Alaphangtól való távolság	Frekvencia szorzótényező	Frekvencia (Hz)
C2	16'	Sub-fundamental	oktáv (lefelé)	0,5	65,406
G3	5 1/3'	Sub-third	kvint	1,5	196
C3	8'	Fundamental	alaphang	1	130,81
C4	4'	Second	oktáv	2	261,63
G4	2 2/3'	Third	oktáv+kvint	3	392
C5	2'	Fourth	2 oktáv	4	523,25
E5	1 3/5'	Fifth	2 oktáv + nagy terc	5	659,26
G5	1 1/3'	Sixth	2 oktáv + kvint	6	784
C6	1'	Eighth	3 oktáv	8	1046,5

2-I. táblázat: Regiszterek

Az orgona hangkeltésében a mechanikából adódóan több, eredetileg nem kívánatos jelenség is közrejátszik. Bár először a hangszer hibáinak titulálták, ezek adják a hang további jellegzetességét, egyediségét.

A hangkerekek szimmetriája és a forgás egyenletessége sem teljesen tökéletes, ezek további színező frekvenciakomponenseket, illetve modulációt eredményeznek. [4] Mivel az összes hangkerék forog, a hangszedők közelében lévő szomszédos kerekek is indukálnak valamennyi áramot a mágnesben. Ez az áthallás a hangnak lebegő, lélegző érzetet ad. A billentyű lenyomásának és elengedésének pillanatában a működésbe lépő áramkörök tranziensei szélessávú kattanás-szerű hangot keltenek. [4] Ez a zaj, az úgynevezett „key click” perkusszív hatása miatt igen kedvelt tulajdonsága lett a hangszernek. Ennek köszönhetően került az orgonába egy új funkció, az úgynevezett „percussion”.

A percussion funkcióval a második vagy harmadik felharmonikus a hang kezdetekor erőteljesebben, impulzus-szerűen van jelen. Ez a key click hatását erősíti, még pregnánsabbá teszi a hang megszólalását. [2] A percussion monofónikus effekt, legato, vagy akkordikus játék esetén csak az elsőként leütött hanghoz adódik hozzá. Az effekt részletesebb ismertetésére a 3.3. pontban kerül sor.

Az orgona által keltett hangot a már említett Leslie-hangszóró sugározza a térbe, ezt részletesen az 5. fejezet tárgyalja.

3 Modellalkotás

A hangszintézis célja a hang egy olyan modelljének megalkotása, amely a lehető legnagyobb mértékben hasonlít az eredeti hangszer hangjához. Az analitikus szintézis alapelve, hogy a hangot analízis segítségével (például spektrális kép vizsgálata) komponensekre bontja. A hang kialakulásában fontos szerepet játszó jellegzetes összetevők előállításával, és az elhanyagolható elemek elhagyásával közelíti a kívánt hangot. A modellezett hang előállítása történhet analóg módon különböző elektronikus eszközökkel, oszcillátorokkal, szűrőkkel, illetve digitálisan. Dolgozatom során mind a Matlab, mind VST környezetben digitálisan előállított jelekkel dolgoztam.

A VST-be ültetendő modelleket Matlab környezetben implementáltam. A feladat megvalósításához többféle szintézis módszer közül kellett kiválasztanom legmegfelelőbbet. A következő alpont ezek közül tekinti át a legelterjedtebbeket.

3.1 Szintézis módszerek

3.1.1 Additív szintézis

Az additív szintézis a Fourier-sorfejtésen alapul, Fourier-szintézisnek is nevezik. A módszer lényege, hogy a bizonyos matematikai feltételeknek eleget tevő periodikus jel leírható végtelen számú szinuszos jel összegeként, és véges számú taggal is igen jó közelítést ad. Ennek az elvnek volt az első kísérlete a Hammond-orgona. A módszer felharmonikusokban dús hangzás esetében problémás, analóg megvalósítása korlátokba ütközik (lásd tonewheel struktúra), illetve digitális esetben nagy kapacitást igényelhet. [5]

3.1.2 Szubtraktív szintézis

Az additív eljárás problémájának megoldása, hogy sűrű spektrumú jelet állítunk elő (például négyszög-, fűrész-, háromszögjel, illetve különböző színű zajok), és ebből megfelelő szűrők segítségével vágjuk a nem szükséges frekvenciatartományokat. Felharmonikusokban gazdag jelek előállítására jól alkalmazható módszer, kevesebb harmonikussal rendelkező jeleknél viszont nem célszerű. [5]

3.1.3 Hullámtáblás szintézis

A módszer ötlete, hogy az eredeti hangszer rögzített hangmintája szolgál meg egy adott hang aktiválásakor. Erre épít a PCM (Pulse Code Modulation) eljárás. A digitális technika fejlődése a felvett hangminták jó minőségű tárolását tette lehetővé, ám a véges helykapacitás miatt csak rövid minták folyamatos ismétlésével generálható a hang. A hangrögzítés a spektrális összetevőket a többi eljáráshoz képest kevésbé torzítja, viszont csak az adott pillanatban, adott pontban hallható hangot adja vissza, ami rontja a modell minőségét. A tranziens jelenségek modellezése bonyolultabb, illetve a hurkolt minta mellett a tranziens minták külön beépítésére és vezérlésére van szükség. Az előállított hang periodikus és determinisztikus, így sztochasztikus folyamatok modellezése ezzel a módszerrel nem kivitelezhető, ami néhány hangszer esetében jelentős korlát. [5]

3.1.4 Fizikai alapú szintézis

A fizikai alapú hangszintézis az előbbiektől eltérő módon közelíti meg a modellezést. Magát a hangszert, és a hangszerben lejátszódó folyamatokat modellezi. A hangot keltő rendszer differenciálegyenletekkel leírt virtuális másának megalkotása a cél, a hangszer geometriájának, anyagi jellemzőinek, és a gerjesztés paramétereinek függvényében. Ez például húros hangszerek esetében a hangszer testében a hurok megpendítésének hatására létrejövő rezgések modellezését jelenti, vagy fúvósok esetében a hangszerben lévő légoszlop viselkedésének leírását, a befűjt levegő sebességétől, illetve a játékos szájtartásától függően. A hullámforma a rendszer gerjesztésére adott válaszként, az egyenletek megoldásával áll elő. A módszer valóság-hű modellezést tesz lehetővé, azonban a hangminták előállítása a matematikai rendszer bonyolultságának köszönhetően igen nagy számítási kapacitást igényel, emiatt a legtöbb esetben ésszerű egyszerűsítésekre, közelítésekre van szükség a modellalkotás során. [6]

3.2 A Hammond-orgona modellje

Mivel a Hammond-orgona hangja Fourier-szintézis eredményeként jött létre, kétségtelen, hogy a hangszer alap konstrukciójának modellezéséhez is ez a módszer a leginkább célravezető [4], de a fizikai alapú szintézissel is foglalkozom a későbbiekben,

a Leslie-hangszóró modellezésekor (5.3. fejezet). A modellalkotáshoz először tanulmányoztam egy referenciaként szolgáló Hammond-orgona szimulációt [7]. A plugin hangmintáinak frekvenciatartománybeli vizsgálata is az additív szintézis indokoltságát támasztja alá. Látszik ugyanis a spektrumból, hogy a hang kevés (minden harmonikus megszólaltatása esetén is maximum kilenc), tisztán kivehető harmonikusból tevődik össze (3.1. ábra).

Korrekt közelítést ad, ha a regiszterek állásának megfelelő amplitúdó-arányokkal összegezzük a kilenc, különböző frekvenciájú harmonikust. Ekkor a hang folytonos időben leírható a következő összefüggéssel:

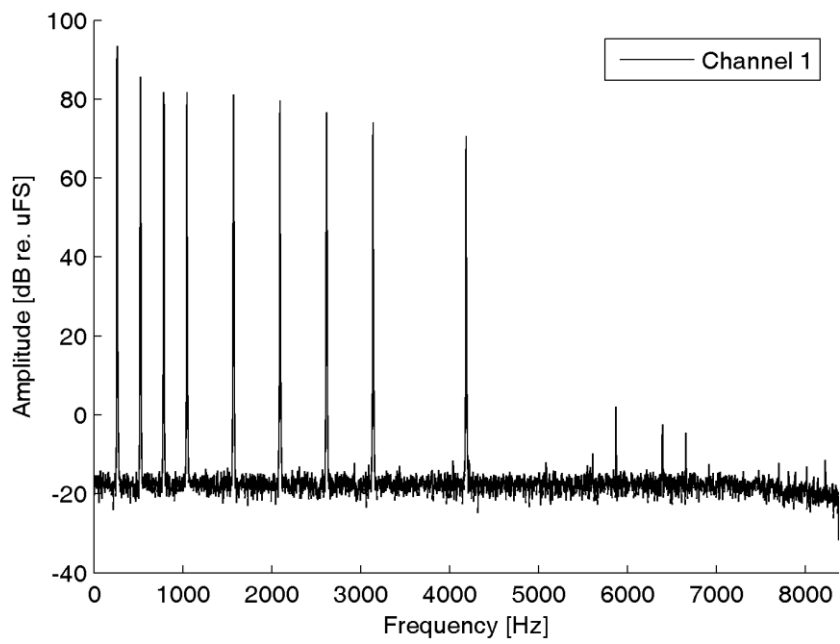
$$S(t) = \sum_{i=1}^9 a_i \cdot \sin(k_i 2\pi f_0 t), \quad (3.1)$$

ahol a_i az i -edik regiszter manuálisan beállítható amplitúdó értéke a $[0,1]$ intervallumban, f_0 [Hz] a hang alapfrekvenciája, k_i pedig az i -edik regiszterhez tartozó konstans szorzó tényező (2-I táblázat).

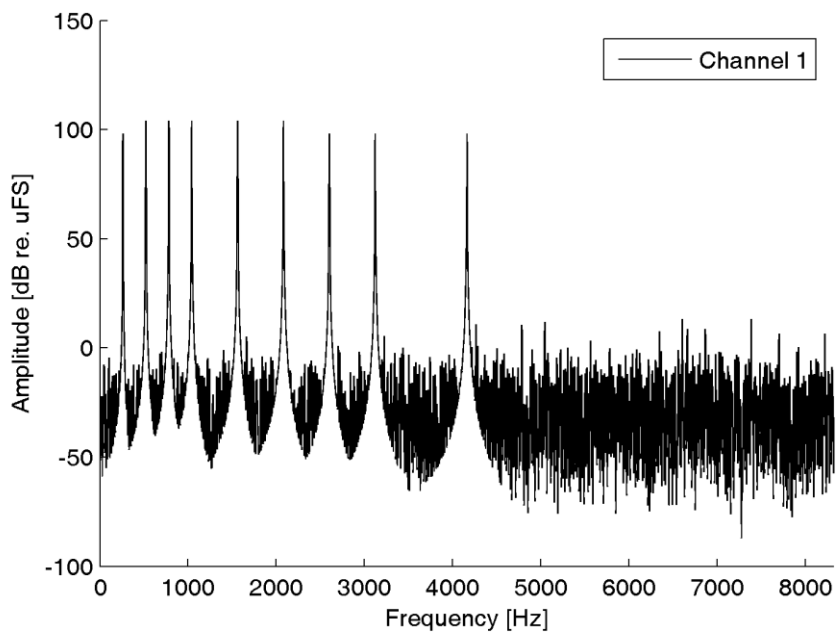
A modell nem veszi figyelembe a 2.2. pontban említett belső aszimmetriából és konstrukciós hibákból adódó jelenségeket, tehát az elv tulajdonképpen Hammond eredeti céljának felel meg, egy ideális Hammond-orgona virtuális megvalósítása.

Matlabban implementáltam egy rövid hangminta szintézisét az előzőekben leírtak alapján. A hangmintában mind a kilenc harmonikust megszólaltattam, 1 vagy 0,5 amplitúdó értékkel. A szinuszos komponensek összegzésén kívül a hangot úgynevezett ADSR burkológörbével szoroztam meg. Az ADSR burkológörbe a tartott hangok megszólalásának jellegzetes amplitúdómenetét modellezi. A hang megszólalása általánosan négy eseményből tevődik össze, ezek időrendi sorrendben a felfutás (Attack), a maximális amplitúdó elérése utáni „elhalás” (Decay), a hang kitartása állandósult amplitúdóval (Sustain), és a hang elengedését követő lecsengés (Release). Ez a burkológörbe valamennyi szintézis során használatos. A hangmintát létrehozó kód megtalálható a 10.2.1. függelékben.

A létrehozott hangminta szubjektív megítélésem alapján igen jól adta vissza a várt hangzást. Megvizsgáltam a minta spektrumát is (3.2. ábra), és összehasonlítottam a referencia plugin mintájának spektrumával (3.1. ábra). A modell frekvenciatartománybeli képe zajosabb ugyan, de szintén jól kivehetőek a hangot alkotó harmonikusok, és amplitúdóviszonyaik. A referencia minta képén három additív harmonikus is megjelenik. Ezek a modell zajával közel azonos amplitúdójúak.



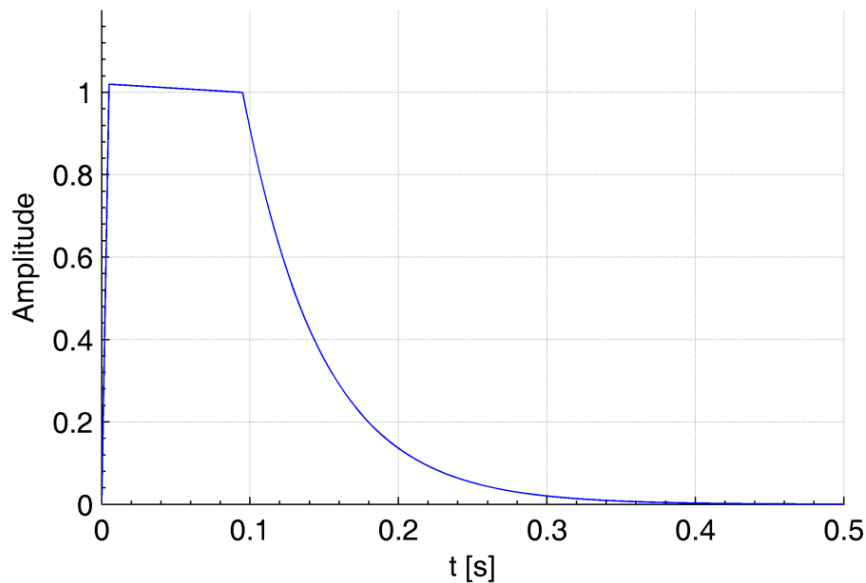
3.1. ábra: Referencia szimuláció full drawbar spektruma



3.2. ábra: A modell full drawbar spektruma

3.3 Percussion modell

A percussion effekt fontos eleme a jellegzetes Hammond hangzásnak, ezért modellezése szükséges. Megvalósításához valamelyik (tipikusan a második illetve harmadik) felharmonikust speciális amplitúdó-burkológörbével kell hozzáadni a többi komponenshez. Az így hozzáadott harmonikust gyors felfutás és rövid ideig tartó megszólalás után hirtelen lecsengés jellemzi. Ezt a tipikus percussion burkológörbét a 3.3. ábra szemlélteti. [4]



3.3. ábra: A percussion burkológörbéje

A burkológörbe hasonlít a hang effekt nélküli burkolójához, a meghatározó különbséget a fix időtartamú kitartott rész adja. Gyakorlatilag felfogható úgy, mint egy ADSR görbe S komponens nélkül. A három szakasz rendre megegyezik az ADSR görbe Attack, Decay, és Release szakaszával.

3.3.1 Lineáris burkoló komponensek

Az első modellemben az Attack és Decay szakaszt lineáris görbékkel közelítettem, a Release szakaszt pedig exponenciális lecsengéssel valósítottam meg. A modell bemenő paraméterei:

- Attack időtartama: t_A [s]
- Attack végén elért amplitúdó érték: p
- Decay időtartama: t_D [s]

- Decay végén elért amplitúdó érték: a
- Release exponenciális lecsengésének az időállandója: τ [s]
- A percussion harmonikus frekvenciája: f [Hz]

Az Attack szakasz meredeksége:

$$m_A = \frac{p}{t_A} \quad (3.2)$$

A hang kezdő amplitúdó értéke nulla, így az Attack szakaszt leíró egyenes:

$$A_{Attack}(t) = m_A \cdot t \quad (3.3)$$

A Decay szakasz meredeksége:

$$m_D = -\frac{p-a}{t_D} \quad (3.4)$$

A Decay szakaszt leíró egyenes:

$$A_{Decay}(t) = m_D \cdot t + p \quad (3.5)$$

A Release szakaszt leíró görbe:

$$A_{Release}(t) = a \cdot e^{-[t-(t_A+t_D)]/\tau} \quad (3.6)$$

A három szakasz egymáshoz illesztésével megkapjuk a burkológörbét:

$$A(t) = \begin{cases} A_{Attack}(t), & t \leq t_A \\ A_{Decay}(t), & t \leq t_A + t_D \\ A_{Release}(t), & t > t_A + t_D \end{cases} \quad (3.7)$$

A kiválasztott f frekvenciájú harmonikus $A(t)$ – vel való szorzásával kapjuk meg a percussion hatást. A valóság-hű modell kulcsa a paraméterek értékeinek jó megválasztása. Célszerű a felfutás idejének, illetve a gyors lecsengés érdekében a τ időállandónak is kis értéket adni. A Decay szakasz amplitúdó esését $(p - a)$ szintén érdemes minimálisra választani. Némi kísérletezés után a kívánt hatást a következő értékek hozták meg:

- $t_A = 5 \text{ ms}$
- $p = 1,02$
- $t_D = 90 \text{ ms}$
- $a = 1$
- $\tau = 5 \text{ ms}$

Az így kapott burkológörbe szerepel a 3.3. ábra: A percussion burkológörbéje, a modell Matlab implementációját pedig a 10.2.2. függelék tartalmazza.

A klasszikus Hammond-orgonákon először csak azt lehetett kiválasztani, hogy a második vagy a harmadik felharmonikus szólaljon meg perkusszívan. Később, a digitális modellezés egyik nagy előnyeként megjelentek a percussion karakterét változtató opciók. Egy tipikus digitális Hammond klónon lehet választani egy gyorsabb és egy lassabb elhalás között, illetve két hangerőérték között. A mintaként szolgáló Hammond plugin már lehetőséget ad magasabb harmonikusokra, illetve folytonosan állítható elhalás és hangerő értékekre. A célom az volt, hogy a modellemben ennél is nagyobb részletességgel lehessen változtatni az effekt egyes paramétereit.

3.3.2 Exponenciális burkoló komponensek

A végső modellben mind a három szakaszt exponenciális görbével valósítottam meg. A szakaszok egymáshoz illesztése az első modellhez hasonlóan a (3.7) egyenletben leírtak szerint történik, az egyes szakaszokat leíró egyenletek pedig a következők:

$$A_{Attack}(t) = a \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_A}\right)} \right] \quad (3.8)$$

$$A_{Decay}(t) = a \cdot \left[e^{-\frac{t-T_A}{\tau_D}} \right] \quad (3.9)$$

$$A_{Release}(t) = a \cdot \left[e^{-\frac{t-T_A}{\tau_D}} \cdot e^{-\frac{t-T_A-T_D}{\tau_R}} \right], \quad (3.10)$$

ahol a változók:

- a : maximális amplitúdó
- T_A : Attack időtartama [s]
- τ_A : Attack időállandója [s]
- T_D : Decay időtartama [s]
- τ_D : Decay időállandója [s]
- τ_R : Release időállandója [s]

Ezek a változók mind egy-egy állítható paraméterként szerepelhetnek a plugin-ben. A maximális amplitúdó a percussion fő hangerejét jelenti. Az Attack időtartama a felfutás gyorsaságát, élességét határozza meg. Az Attack időállandójának olyan értéket kell választani, hogy a görbe a Decay szakasz kezdetére elérje a maximális amplitúdót.

A változó e feltételen belüli változtatása nem ad lényeges, érzékelhető különbséget, ezért ez kihagyható az állítható paraméterek listájából. A Decay időtartama a hang hosszát, időállandója pedig az amplitúdó esést határozza meg. A Release időállandójával lehet meghatározni a lecsengés hosszát.

4 A szintetizátor megvalósítása VST környezetben

A hangszer modelljének megalkotását követően került sor a szintetizátor megvalósítására, melyre a VST (Virtual Studio Technology) szoftver környezetet használtam. A fejezetben ismertetem a VST fogalmát, a fejlesztéshez szükséges ismereteket, illetve bemutatom a C++ programozási nyelven fejlesztet plugin belső felépítését, a program működésének megértéséhez szükséges tudnivalókat, és a dolgozat témájának szempontjából releváns kódrészleteket.

4.1 Virtual Studio Technology

A Virtual Studio Technology (VST) egy szoftver interfész, amely zenei szoftverek és hardverek, például virtuális stúdió szoftverek, hangrögzítő rendszerek számára nyújt lehetőséget digitális jelfeldolgozáson alapuló audio szintetizátorok, effektek, és egyéb zenei alkalmazások használatára. A platformot a Steinberg zenei termékeket forgalmazó cég fejlesztette ki, és tette világméretű szabvánnyá. A VST lehetőséget teremt a stúdiózásra és zeneszerkesztésre, az adott zenei egységek, költséges berendezések konkrét hardveres megléte nélkül. [8] [9]

A VST rendszer legelterjedtebb használata a VSTi virtuális hangszerek és VST audio effektek megszólaltatása úgynevezett digitális audio munkaállomások (digital audio workstation - DAW) bővítményeként. Ilyen munkaállomás például az Audacity, Logic Pro, GarageBand, de a legismertebbek közé tartozik a Steinberg Cubase nevű programja is. Ezeket a DAW-okat nevezzük általánosságban a VST rendszer „host programjának”, a DAW különböző szoftveres bővítményeinek összefoglaló neve pedig a „plugin”.

Plugin lehet szintetizált hangszereken kívül bármilyen fantázia hangszín, effekt (kórus, zengető, visszhang, torzító, stb...), de akár más zenei kiegészítő is, például spektrumanalizátor. A plugin-ok a host programon belül valamilyen grafikus felületen keresztül teremtenek kapcsolatot a felhasználóval. A felületen érhetőek el a hangszer, vagy effekt állítható paraméterei, általában az adott hangszerhez kapcsolódó jellegzetes grafikával, vagy a host program beépített megjelenítő grafikájával. A host program és a

VST plugin kapcsolatának és a rendszer működésének megértéséhez szükség van a MIDI protokoll áttekintő ismeretére, melyet a következő alfejezet ismertet. [9]

4.1.1 MIDI protokoll

A MIDI (Musical Instrument Digital Interface) zenei információkat továbbító átviteli protokoll. A protokoll hangszerek, zenei eszközök egymás közti kommunikációjára lett kitalálva, eredetileg az élő játék közbeni valós idejű kapcsolat megteremtésére. A MIDI bináris formában továbbít zenei eseményeket. [10] Nem audio jelet tartalmaz, hanem az audio jel létrehozásához szükséges vezérlő információkat, amely magában foglalja a jel tulajdonságait meghatározó paraméterek definiálását. A MIDI először a billentyűs hangszerek manuálja és az audio jelet előállító modul közötti kommunikációra volt használatos. Egy MIDI üzenet különböző típusú információkat tartalmazhat, ezek közül a legfontosabbak a következők [11] :

- *Note On/Off*: billentyű leütése illetve felengedése (hang kezdete és vége)
- *Voice*: a leütött hang hangmagassága (C0-G10)
- *Velocity*: a leütés erőssége (hangerő dinamika)
- *Aftertouch*: az újabb klaviatúrák a billentyű lenyomás erejének leütés utáni változtatására is érzékenyek
- *Main Volume*: fő hangerő
- *Pitch-bend*: hangmagasság moduláció

Ezekon kívül további információk lehetnek jelen a MIDI üzenetekben a hang egyéb modulációjáról, és játék közben manuálisan állított paraméterváltozásokról. A korszerű MIDI billentyűzeteken egy úgynevezett modulációs kerékkel lehet a hangot színezní, tipikusan vibrato, tremolo effekttel, a Hammond-orgona hangzások esetében pedig ezzel a kerékkel lehet a Leslie effektet előhívni.

A MIDI protokoll a VST-hez hasonlóan szabvánnyá nőtte ki magát a szoftver alapú audiotekniká világában, illetve ma már az itt leírtaknál több funkciót lát el.

4.1.2 A plugin és a host program kapcsolata

A host program és a VST plugin közötti kommunikációnak a létrehozása és fenntartása a host program feladata, a kommunikáció alapja pedig a MIDI protokoll. Virtuális hangszer esetében, a host program a hozzá csatlakoztatott külső, vagy saját virtuális billentyűzetén történő események alapján MIDI üzenetet állít elő és küldi

tovább a plugin felé, a plugin pedig a MIDI üzenet tartalmának megfelelő digitális jelalakot (hangmintát) generálja, megírt algoritmusa szerint. Az effektek esetében már meglévő audio jelet módosít a program, illetve létezik az úgynevezett VST MIDI effekt is, amelynek bemenete és kimenet is MIDI, a plugin a MIDI adaton végez módosításokat és továbbítja azt. A legtöbb host program képes a különböző típusú plugin-ok tetszőleges láncolására is. [9]

4.1.3 Software Development Kit (VST SDK)

A Steinberg lehetővé tette magánszemélyek, fejlesztők számára is a VST plugin fejlesztést. A cég internetes oldalán [12] ingyenesen elérhető egy szoftverfejlesztő programcsomag (Software Development Kit), amely néhány minta plugin-t tartalmaz, VSTi hangszer, és VST effektet egyaránt, illetve azok fejlesztéséhez szükséges teljes fejlesztői környezetet.

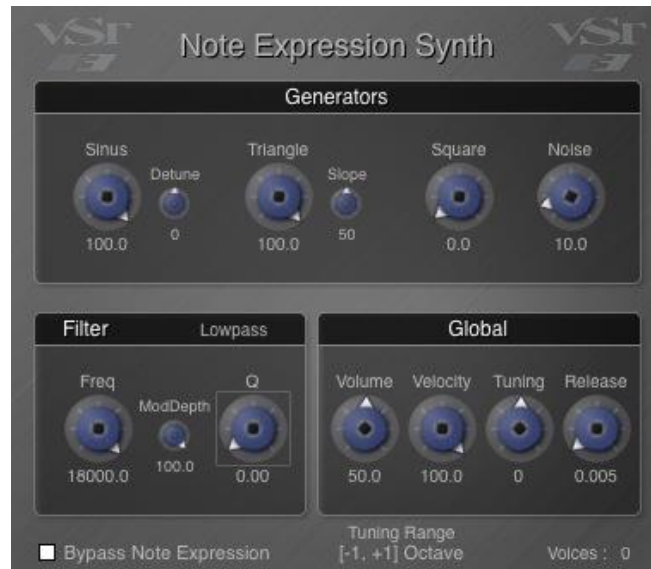
A programcsomag főként C++ nyelven írt forráskódokból és Visual Studio projectekből áll. Egy adott plugin-hoz tartozó forrásfájlok egy `.vst3` kiterjesztésű fájl létrehozására képesek. Ez a fájl tulajdonképpen a plugin, melyet a megfelelő könyvtárba helyezve a host program felismer, kapcsolatot tud vele teremteni, és elérhetővé tudja tenni a felhasználó számára a programon belül. Ezen kívül a csomag része minden egyéb fájl is, ami részét képezi a pluginnak, például a grafikus felületek létrehozásáért felelős programkódok, és a hozzájuk tartozó grafikák. A jelenleg elérhető SDK verzió a legfrissebb VST szabvány, a VST3 része.

4.2 Kiindulás

A SDK csomagban közzétett forráskódok belső működésének kellő ismeretében a minta plugin-ok módosíthatóak, a módosítások eredményeként pedig új plugin hozható létre. A plugin fejlesztés során a VST-SDK csomag forráskódjait használtam fel, melyeket Microsoft Visual Studio 2010 fejlesztői környezetben módosítottam, host programnak pedig a Fruity Loops Studio szoftver [13] szolgált.

A programcsomagban megtalálható egy „*Note Expression Synth*” nevű minta VSTi plugin. Ez egy egyszerű szintetizátor, szinusz, háromszögjel, négyszögjel, és zaj tetszőleges keverésével és egy aluláteresztő szűrővel generálható a hangminta. Változtatható a szűrő határfrekvenciája és karakterisztikája, illetve állítható néhány

globális paraméter, mint fő hangerő, alaphangolás, lecsengés. A 4.1. ábra mutatja a plugin betöltésével megjelenő grafikus felületet.



4.1. ábra: A minta plugin grafikus felülete

Munkám során a *Note Expression Synth* plugint létrehozó forrásfájlokat vettem alapul. A programcsomag tartalmaz *html* dokumentumok formájában egy teljes körű dokumentációt, ebben megtalálható a *Note Expression Synth* programkódjainak leírása is. A programot az alapvető szerkezetet meghagyva dolgoztam át, a meglévő osztályok, struktúrák, függvények átalakításával, kiegészítésével, de a feladat természetesen megkövetelte azt is, hogy új osztályokat és függvényeket építsek be a kódba. A következő alfejezetben a példa plugin programjának felépítése kerül bemutatásra.

4.3 A VST program felépítése

A `vst3sdk\public.sdk\samples\vst` útvonalon érhető el a plugin forrásfájljait tartalmazó `note_expression_synth` (majd később `hammond_organ`) nevű mappa. A win alkönyvtárban található `.sln` kiterjesztésű Visual Studio Solution fájl megnyitásával a Visual Studioban láthatóvá és szerkeszthetővé válik a plugin-hoz tartozó összes forrásfájl. A „*Source Files*” könyvtár tartalmaz közvetlenül forrásfájlokat illetve további alkönyvtárakat. Az alkönyvtárakban lévő fájlok a plugin létrehozásához és működéséhez szükséges általános funkciókat látják el, mint például a 4.1.2. fejezetben kifejtett kommunikáció létrehozása a plugin és a host alkalmazás között. A fejlesztés során e programrészek megismerésére, módosítására nem volt szükség. Kivételt képez

ez alól a *Resources* mappában található *.uidesc* kiterjesztésű fájl, ami a grafikus felületért felelős programkódot tartalmazza.

A „*Source Files*” könyvtárból közvetlenül elérhető források érdekesek a fejlesztés szempontjából. Itt találhatóak a program lényegi részét képező *cpp* és *header* fájlok. A program törzsét három osztály alkotja, a *Voice*, a *Processor*, és a *Controller*. A plugin megvalósítása során ezek az osztályok kerültek módosításra, ami megkövetelte a feladatuk, szerepük, kapcsolatuk megértését, ismeretét. A program működésének, és a megírt kódrészletek megértéséhez a három osztály részletes bemutatására van szükség, melyre a következő szakaszokban kerül sor.

4.3.1 Voice

A *Voice* osztályban történik tulajdonképpen a hangminta előállítása a különböző paraméterek alapján. Ebbe beletartozik minden olyan paraméter, ami meghatározza az előállítandó hangot, mint például a Hammond-orgona esetében az egyes harmonikusokhoz tartozó amplitúdóértékek, vagy éppen a későbbiek során a Leslie-hangszóró forgási sebessége. A paraméterek deklarációja a *VoiceParameters* felsorolásban és a *GlobalParameterState* struktúrában történik. A *Voice* sablon osztály, melynek paramétere a *SamplePrecision*. A *Voice* a következő függvényeket tartalmazza:

- `void setSampleRate (ParamValue sampleRate)`
A mintavételi frekvenciát (pl. a szabványos 44100 vagy 48000 Hz értéket) beállító függvény.
- `void reset ()`
Alapértelmezett értékekre állítja be az egyes paramétereket, változókat.
- `void setNoteExpressionValue (int32 index, ParamValue value)`
A későbbiekben ismertetett *note expression* típusú üzeneteket kezelő függvény.
- `void noteOn (int32 pitch, ParamValue velocity, float tuning, int32 sampleOffset, int32 nId)`
Billentyű lenyomáskor, azaz egy adott hang generálásának kezdetekor hívódik meg. A függvényparaméterek a hanghoz tartozó MIDI instrukciók, a függvény ezek alapján ad értékeket az előállítandó hang paramétereinek, bizonyos változóknak pedig a hang kezdeti időpillanatának megfelelő értéket ad.

Ezen kívül némelyik globális paraméternek létezik egy aktuális megfelelője, ami itt kapja meg a globális paraméter értékét, majd ezzel dolgozik az alább bemutatott process függvény.

- `void noteOff (ParamValue velocity, int32 sampleOffset)`
A billentyű elengedésekor meghívódó függvény, a hang lecsengéséért felelős.

- `bool process (SamplePrecision* outputBuffers[2], int32 numSamples)`

Ebben a függvényben történik a hangminta definiálása, itt írandó meg a mintát létrehozó algoritmus. A `process` minden megszólaltatni kívánt hangra meghívódik, és az algoritmus szerint generált minta értékét hozzáadja a kimeneti puffer értékéhez, így több hang esetén a minták összegzésével áll elő a jel. Ez a függvény kezeli továbbá a hang megszólalásakor a felfutást, mivel a `noteOn` csak a kezdeti értékek beállítását végzi.

4.3.2 Controller

A `controller` osztály teszi lehetővé a felhasználó számára az egyes paraméterek változtatását. A vezérelhető paraméterek a header fájl felsorolásában vannak definiálva. Itt adható az egyes változóknak egy egész számú érték, amely a paraméter azonosítójaként szolgál a grafikus felület fejlesztői környezetében.

A `controller initialize` függvénye végzi az állítható paraméterek inicializálását. Az `initialize` egyik feladata, hogy létrehozza a paraméterhez tartozó látható és kezelhető objektumot a host felületen. Megadható az egyes paraméterek neve és mértékegysége string-ekkel, illetve az állítható értékek alsó és felső határa, valamint alapértelmezett értéke. Ez a következő kódblokkokban történik:

```
// Új paraméter létrehozása
param = new RangeParameter (USTRING("<paramtéter elnevezése>"),
<paraméter>, USTRING("<mértékegység>"), <alsó határérték>, <felső
határérték>, <alapértelmezett éreték>);
param->setPrecision (1); // Felbontás: 0,1
parameters.AddParameter (param); // Az új paraméter listába vétele
```

Ezen kívül az `initialize` létrehoz minden egyes paraméternek egy úgynevezett „*Note Expression*”-t. A *Note Expression* egy üzenettípus, ami a MIDI-hez

hasonlóan a vezérlői események információit tartalmazza, és továbbítja a processor felé. Minden *Note Expression*-hez tartozik egy típusazonosító is, ezek deklarációja a szintén a header fájlban található. A controller további függvényei a vezérlői adatok, javarészt a *Note Expression* üzenetek kezeléséért, és továbbításáért felelősek. A szintetizátor megvalósítása során ezek a függvények nem kerültek átírásra, ezért bemutatásukra a dolgozat nem tér ki.

4.3.3 Processor

A processor teremt kapcsolatot a voice és a controller között, feladata a paraméterváltozások átadása a voice osztálynak. A fejlesztésben két függvényének van szerepe, ez az osztály nevével megegyező processor, és a process, ami pedig nem összekeverendő a voice megegyező nevű függvényével.

A processor-ban történik a paraméterek kezdeti értékadása. A plugin betöltésekor ezeket az értékeket kapják meg a voice globális paraméterei, ennek megfelelő hang fog megszólalni.

A process felelős tulajdonképpen a vezérlői üzenetek továbbításáért. A voice paramétereinek változások szerinti új értékadása a process függvény switch szerkezetében történik, minden paraméter esetében egy külön case blokkban. Ez a fő hangerő példáján a következő formában található meg a programkódban:

```
case kParamMasterVolume:
{
    paramState.masterVolume = value;
    break;
}
```

4.4 A fejlesztés

A Hammond-orgona plugin létrehozásának első lépése a *Note Expression Synth* szintetizátor átalakítása egyetlen szinusz jelet megszólaltató szintetizátorrá, melynek egyetlen vezérelhető paramétere a szinusz hangereje. Ehhez elsősorban a `Voice::process` mintát generáló algoritmusának leegyszerűsítésére volt szükség. Ekkor a többi generálható jelalakra, és a szűrőre vonatkozó paraméterek fölöslegessé válnak. Ezek és az orgona szintetizátor megvalósításához később nem szükséges egyéb

globális paraméterek és változók eltávolítandóak a program azon kódrészleteiből, amelyeket a 4.3. fejezet megemlít.

Az így kapott programból felépíthető a Hammond-orgona szintetizátor. Ehhez a fent bemutatott Matlab modelleket ültettem át a VST környezetbe a szükséges új változók, paraméterek felvételével. A vezérelhető paramétereket a 4.3. fejezetben leírtak alapján hoztam létre a szükséges kódrészletek megírásával, a megmaradt szinuszhangerő mintájára, a változók elnevezéseiben is követve a program által adottakat. A szintetizátor vezérelhető paramétereinek összefoglalása megtalálható a függelékben (10.1.). A dolgozat elektronikus melléklete tartalmazza a teljes Visual Studio projektet a programot alkotó valamennyi forrásfájllal együtt, ezekben megtalálhatóak a továbbiakban hivatkozásra kerülő kódrészletek. A modellek VST implementálásának fő lépéseit a következő alpontok fejtik ki.

4.4.1 Harmonikusok

A szinuszminta generálása a programban tehát adott a `Voice::process` függvényben, és a következőképpen történik:

```
SamplePrecision sample;  
sample=(SamplePrecision)(sin(n*sinusFreq+sinusPhase)*currentSinusVolume);
```

Az `n` változó a mintavételi ciklusszámláló, a `sinusFreq` a hangmagasságnak megfelelő frekvencia a mintavételi frekvenciával (`sampleRate`) normálva, így szorzatuk megfelel az idő és a frekvencia szorzatának. A `currentSinusVolume` az állítható paraméter. A harmonikusok hozzáadása a mintához ebből igen egyszerűen megtehető a frekvencia megfelelő értékkel való szorzásával. A végleges hangminta definíció természetesen a Leslie-hangszóró modellezése során ennél bonyolultabbá válik, további tagokkal bővül, illetve módosul. A forgó hangszóró szimulációjával részletesen a következő fejezet foglalkozik, így a modell VST implementációja is később, e fejezet részeként kerül bemutatásra.

Az autentikus Hammond-orgona hangzás eléréséhez még két kisebb módosításra volt szükség. A Hammond-orgona billentyűinek megnyomásakor az adott hang fix hangerejű megszólalását aktiváljuk, a hangerősség nem érzékeny a billentés erősségére. Ezt az információt a MIDI üzenetből kapott `velocity` paraméter hordozza, amelyet a `noteOn` függvényben fix 1 értékre kellett definiálni. Ezen kívül az alapbeállítások mellett a hang lecsengése túl hosszúnak bizonyult, szintén a hangszer elektronikájából

adódóan ez egy átlagos hangszer hangjának lecsengéséhez képest rövidebb. A `noteOff` lecsengésre vonatkozó részének megfelelő módosításával ezt a problémát is könnyen orvosolni lehetett. A hosszú lecsengés a templomi orgona hatását keltette, módosítása meglepően sokat számított a hangzásban.

4.4.2 Percussion

A percussion-t választható effektként építettem be a programba a 3.3.2. fejezetben leírt modell alapján. A program `ParamValue` típusú paraméter változói 0 és 1 között vehetnek fel értéket. A harmonikusok amplitúdóinak esetében ez nem jelent problémát, mivel az amplitúdóarányok határozzák meg a mintát, a percussion esetében viszont az idő, és időállandó értékek felskálázására volt szükség a modell megvalósításához. Ezt a `processor::Processor` kezdeti értékadásainál, és a megvalósítás helyén a `Voice::process` lokális változójánál kell megtenni. Ehhez pedig definiálandó az adott paraméterhez tartozó minimális és maximális érték, illetve megadandó az alapértelmezett érték is. Ezek az adatok szintén megtalálhatóak a függelékben (10.1.).

A 2.2. fejezetben már említésre került, hogy a percussion monofónikus effekt, tehát több hang megszólalása esetén csak az elsőként leütött hangra tevődik rá. Ennek megoldásához a `Voice` osztályban deklaráltam egy `int8` típusú `noteCounter` globális változót, amely a megszólaló hangok számát tárolja. Így a `noteCounter` értékének ellenőrzésével több hang esetén deaktiválható a további megszólaló hangok effektezése.

4.4.3 Grafikus felület

Az eddigiekben megírt program már egy működőképes plugin, amely betölthető a host program beépített megjelenítő felületén. Az SDK lehetőséget ad egyedi, host programtól független grafikus felület létrehozására is, ez az úgynevezett GUI (Graphical User Interface). A VST GUI bármilyen tetszőleges háttér, nyomógomb, potméter grafika betöltését engedi. Fejlesztésére nem fordítottam komolyabb munkát, szintén a meglévő *Note Expression Synth* minta felületét alakítottam át a Hammond plugin képére. A GUI-ra vonatkozó forrás a *Resources* könyvtárban lévő `.uidesc` kiterjesztésű fájl, amely egy `xml` formátumú kód. A Hammond-orgona vezérlésére átformált grafika végleges formája a 6. fejezetben látható (6.1. ábra).

5 A Leslie-hangszóró szimulációja

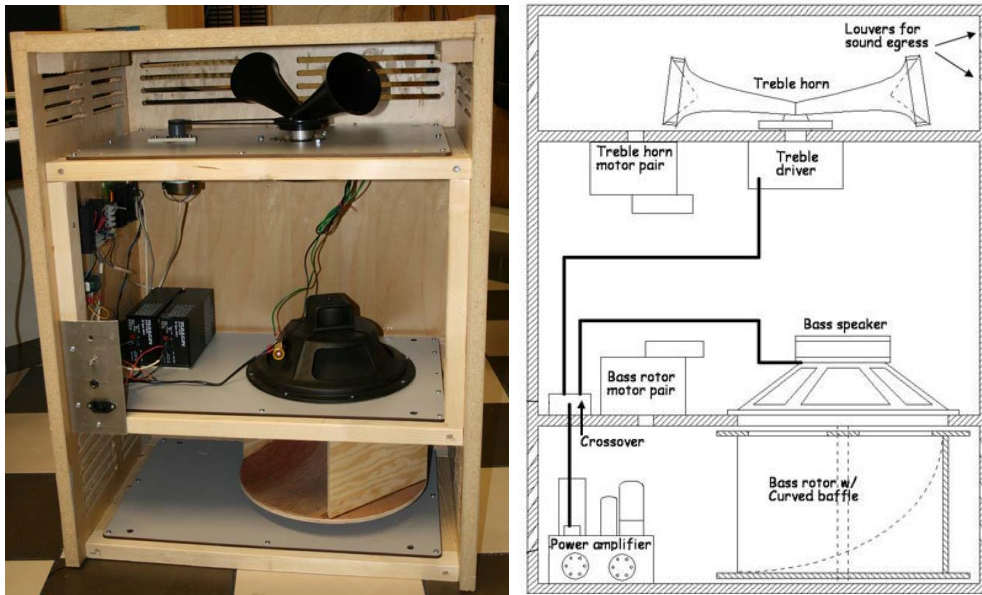
A Leslie-hangszóró a Hammond-orgona hangzásnak teljes értékű része, modellezése kulcsfontosságú a jellegzetes hangzás reprodukálása során. A Leslie-hangszóró fizikailag külön egységet alkot a rendszerben, a Hammond-orgona által keltett hangot sugározza a térbe, jelenléte a hang sokrétű modulációját eredményezi. A működés során fellépő bonyolult fizikai jelenségek miatt modellezése a Hammond-orgona modellezés legnagyobb kihívása.

A fejezetben először ismertetem a Leslie-hangszóró működését, és a különböző modulációs hatásait. Ezután több különböző egyszerűsítéseken alapuló megoldást mutatok be a hangszóró modellezésére. Részletesen leírom a témakör fő részét alkotó fizikai alapú modellezést, és ennek beépítését a VST szintetizátorba.

5.1 A Leslie-hangszóró

A Hammond-orgona önmagában statikus, száraz, egysíkú hangot produkált. Ez volt Donald J. Leslie találmányának motivációja. [1] Leslie is a templomi orgona hangkeltésének körülményeiből indult ki. Az egymástól akár nagy távolságra lévő sípok megszólaltatása, és a nagy teremben létrejövő visszaverődések a hangforrás állandó változásának érzetét kelti. [14] Leslie egy olyan apparátussal szerette volna kiegészíteni az orgonát, amely ezt a jelenséget modellezi. Ötlete mozgó hangforrás kivitelezése volt, a megoldása pedig forgó hangszóró. [1]

A Leslie-hangszóró két forgó hangforrásból, egy magas sugárzóból, és egy mélysugárzóból álló rendszer. A két sugárzó névlegesen szinkronban forog, a közös forgási sebesség két diszkrét érték között, egy lassú és egy gyors üzemmód között változtatható. A két hangszóró egy háromszintes faláda középső rekeszében helyezkedik el egymásnak háttal. A mélysugárzó az alsó, a magas sugárzó pedig a felső rekeszbe sugározza a hangot, melyet egy-egy speciális geometriájú forgó berendezés először horizontális irányba terel, majd szór a térben. A hang a faládán kialakított hangnyílásokon át jut ki a rekeszekből (5.1. ábra). A két hangszóróba jutó hang frekvenciatartományának kettéválasztását az úgynevezett „crossover” váltó szűrő végzi. [15]



5.1. ábra: Leslie-hangszóró és sematikus ábrája [K4] [K5]

5.1.1 A magas sugárzó

A forgó berendezés a magas sugárzó esetében két, szimmetrikusan, egymásnak háttal (180° -ban) elhelyezett, fekete öntött bakelit anyagú tölcser. A hangot csak az egyik tölcser sugározza le, a másik valójában néma. A szimmetrikus geometriának az egyenletes forgásban van szerepe, a forgás közben létrejövő légellenállás így kevésbé hat, mint szimpla tölcser esetében. A tölcser kiegészíthető egy kúp alakú terelővel, amely szűkíti a tölcser szájának a nyílását, illetve a kiáramló hangot oldalirányba tereli. [15]

5.1.2 A mélysugárzó

A mélysugárzó 800 Hz alatti frekvenciatartományban sugároz. A forgó berendezés ez esetben egy nyitott oldalú, íves terelővel ellátott fa dob. A dob geometriájából adódóan lényegesen lassabban éri el a végső forgási sebességet gyors és lassú üzemmód közötti váltáskor. A végső sebesség a tölcser sebességével közel azonos, de ez sem pontosan egyezik meg vele. [15]

5.1.3 A forgó hangforrás akusztikai hatásai

1. A forgás közben változik a hangforrás iránya, illetve a megfigyelőtől való távolsága, ami együttesen amplitúdómodulációt eredményez. Amikor a tölcser szája a megfigyelő irányába néz, a hangot hangosabbnak érzékeli, míg ellentétes irányban halkabbnak. [16]

2. Az aktív tölcser irányának változása a hangszínre is hatással van. Mivel az alacsonyabb frekvenciájú hangok esetében a sugárzás kevésbé irányított, a magasabb összetevőkre jobban érvényesül az amplitúdómoduláció, ezáltal változik a hang spektrális képe. [16]
3. Egymáshoz képest mozgásban lévő hangforrás és megfigyelő esetében fellép a Doppler-effektus. Ez a forgó hangszóra is érvényesül, a megfigyelőhöz képest a hangforrás állandó mozgásban van. A relatív mozgás a sugárzottól eltérő frekvenciájú hang érzékelését eredményezi. Doppler-effektus során a közeledő forrásból sugárzott hangot a ténylegesnél magasabb frekvenciájúnak, míg a távolodó forrásból sugárzott hangot alacsonyabb frekvenciájúnak érzékeli a fül. Ez tehát frekvenciamodulációnak felel meg. Megemlítendő, hogy a hang frekvenciája valójában nem változik, a Doppler-effektus csupán pszichoakusztikus jelenség. [15] [17]
4. Zárt térben megszólaló Leslie-hangszóró hangját jelentősebb visszaverődések tovább modulálhatják [15], illetve a hang „kavargó” hatását növeli a két hangszóró gyorsulásának és sebességének különbsége is.

5.2 Leslie szimuláció egyszerű modulációkkal

A jellegzetes „Leslie hangzást” meghatározó két fő jelenség tehát az amplitúdó- és a frekvenciamoduláció.

A hangzás igen nagy részben a magas sugárzó tölcsernek köszönhető, a mélysugárzó hatása kevésbé észrevehető. A mélysugárzó jóval nagyobb nyílása miatt kevésbé irányított. A hangforrás érzete a hangszóródob közepében marad, így a Doppler-effektus elhanyagolható mértékben lép fel. Az amplitúdómoduláció is kevésbé érvényesül a nyílás szélesebb szórása, és az alacsonyabb frekvenciák miatt. [15] A Leslie szimuláció során ezért eltekintettem a két hangszórós konstrukciótól, és egyelten, a teljes frekvenciatartományt megszólaltató forgó tölcserpár modellezéseként értelmeztem a feladatot. A két hangszóró külön kezelése a gyorsulásaik és sebességeik eltérésének szempontjából érdekes, ám egyes szakirodalmak szerint [15] a hangláda

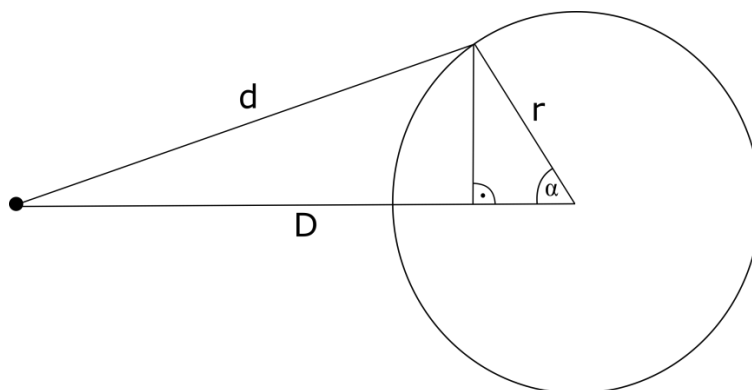
használói közül többen inkább zavaró tulajdonságnak ítélték ezt a jelenséget, és ezért csak a magas sugárzót használták.

Első megközelítésben az amplitúdó- és frekvenciamoduláció egyszerű megoldásával kísérleteztem. A kétféle modulációt külön vizsgáltam, és külön funkcióként építettem be a már meglévő pluginbe, majd figyeltem módosító hatásukat.

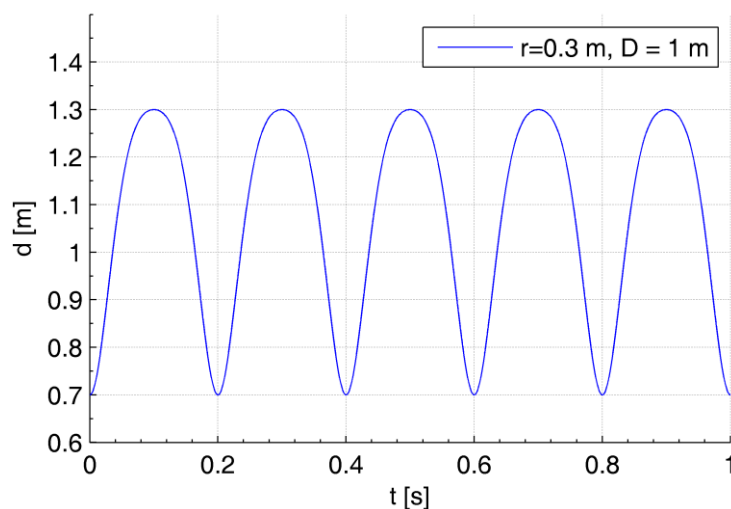
5.2.1 Amplitúdómoduláció

A hangforrás helyének a tölcser szája tekinthető, amely a tölcser hosszával megegyező sugarú körpályán mozog, egyenletes sebességgel. Az amplitúdóváltozás a mozgó hangforrás (álló) megfigyelőtől való távolságának változásával van összefüggésben. A távolság a következőképpen alakul a körpálya sugarának (r), a hangszóró fázisszögének (α), és a megfigyelő középponttól való távolságának (D) függvényében:

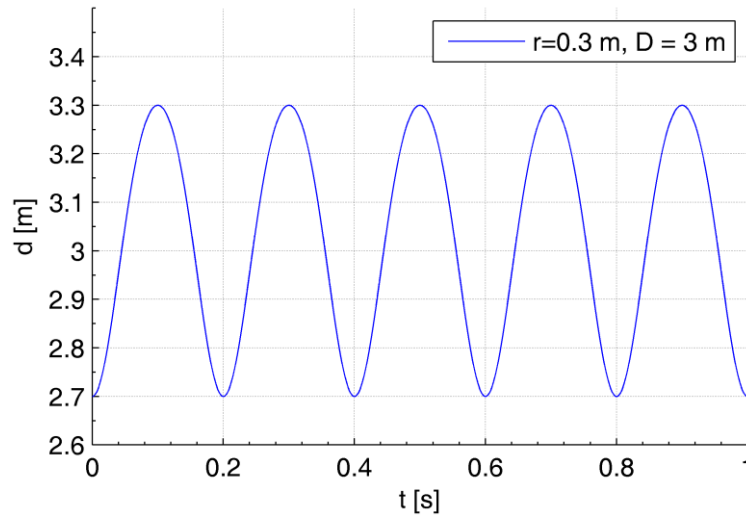
$$d = \sqrt{(D - r \cdot \cos\alpha)^2 + (r \cdot \sin\alpha)^2} \quad (5.1)$$



5.2. ábra: A hangforrás távolsága



5.3. ábra: A távolság időfüggvénye $D = 1$ m esetén



5.4. ábra: A távolság időfüggvénye $D = 3$ m esetén

A fenti ábrákból (5.3. ábra és 5.4. ábra) kiderül, hogy a távolság időfüggvénye függ a körpálya sugarának és a megfigyelő távolságának arányától, illetve látszik, hogy a hangszórótól távolodva a függvény egyre inkább szinuszos görbéhez hasonlít. Feltételezve, hogy a megfigyelő elég nagy távolságra van a hangszórótól, a hang amplitúdóváltozása szinuszos görbével jól közelíthető. A moduláció megvalósításához a percussion effekthez hasonlóan a hang burkológörbét módosítottam. A modulált jel a következő összefüggés alapján áll elő:

$$S_{AM}(t) = S(t) \cdot \{1 + [A \cdot \sin(2\pi f_{AM} t)]\}, \quad (5.2)$$

ahol $S(t)$ a modulálandó jel, A a moduláció mélysége, f_{AM} [Hz] pedig a moduláció frekvenciája, ami a hangforrás forgásának frekvenciájával egyezik meg. A plugin-ben kiválasztható „AM” funkciót úgy építettem be, hogy változtathatóak az f_{AM} és A paraméterek (10.1.). Az így kapott hatás kissé szegényes, egyszerű „tremolo” effektként viselkedik.

5.2.2 Frekvenciamoduláció

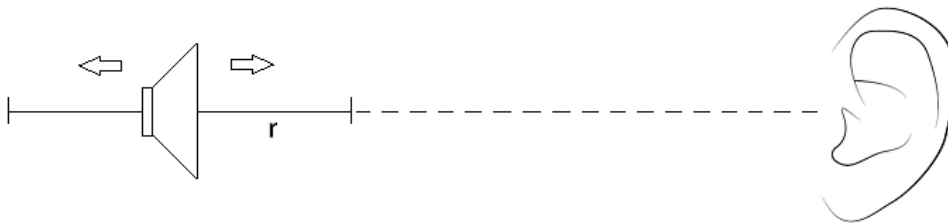
A frekvenciamoduláció alapja a Doppler-effektus (5.1.3-3). A Doppler-effektusból származó frekvenciaeltolódást a hangforrás és a megfigyelő sebessége határozza meg. A frekvencia megváltozására vonatkozó általános összefüggés a következő:

$$\omega' = \omega_0 \cdot \frac{1 + \frac{v_l}{c}}{1 - \frac{v_s}{c}}, \quad (5.3)$$

ahol ω' [rad/s] a modulált körfrekvencia, ω_0 [rad/s] a sugárzott hang alapfrekvenciája, v_l [m/s] a megfigyelő sebessége, v_s [m/s] a forrás sebessége, c [m/s] pedig a hang terjedési sebessége, melynek állandó értéke nagyjából: 340 m/s. A forrás és a megfigyelő sebességei alatt relatív (az egymást összekötő vonalra vetített, a nyugvó közeghez képest mért) sebességeket értünk, melyek közeledés esetén pozitív, távolodás esetén negatív előjelűek. A modellezés során a megfigyelőt tekinthetjük állónak, ekkor $v_l = 0$. Így az (5.3) egyenlet a következő formára egyszerűsödik:

$$\omega' = \omega_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{v_s}{c}}. \quad (5.4)$$

A modellben a forgó hangforrás megfigyelő irányában történő előre-hátra mozgását vettem figyelembe, amely az oldalnézetből vett 5.5. ábra szerinti egydimenziós elmozdulást jelenti.



5.5. ábra: A forgó hangszóró egyirányú elmozdulása

A hangforrás elmozdulása az idő függvényében így a következő:

$$x(t) = r \cdot \cos(\omega_L t), \quad (5.5)$$

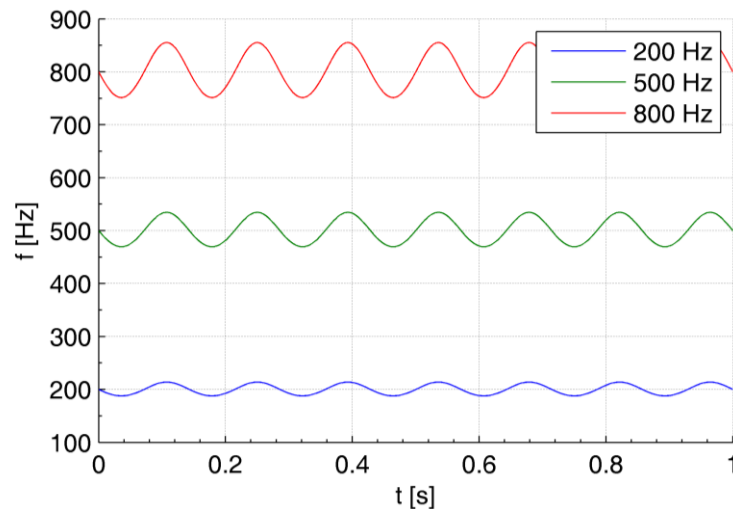
ahol r [m] a hangforrás által bejárt körpálya sugara, ω_L [rad/s] pedig a Leslie-hangszóró forgásának körfrekvenciája. A hangforrás sebességét az elmozdulás deriváltjából kapjuk meg:

$$v_s(t) = x(t)' = -r\omega_L \cdot \sin(\omega_L t). \quad (5.6)$$

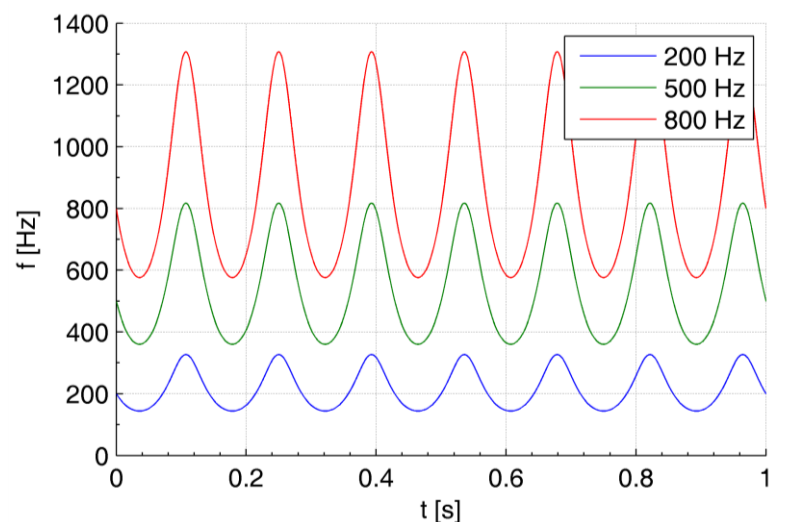
A forrás sebességét behelyettesítve az (5.4) egyenletbe, megkapjuk a frekvencia modulációját az idő, illetve a hangszóró méretének (r) és forgási sebességének (ω_L) függvényében:

$$\omega' = \omega_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{r\omega_L \cdot \sin(\omega_L t)}{c}} \quad (5.7)$$

A hangszóró sugarának reális értéke körülbelül 30 cm, a forgás leggyorsabb frekvenciája pedig 8 Hz körüli érték. A hangszóró paramétereinek valóságú megválasztása mellett a fenti képlet (5.7.) alapján megvalósított frekvenciamoduláció az amplitúdómodulációhoz hasonlóan gyakorlatilag szinuszos görbét ír le. A szinuszos görbe torzulása körülbelül 2 méteres sugárnál kezd észrevehetővé válni, 3 méteres sugárnál már szembetűnő, amit az alábbi (5.6. ábra és 5.7. ábra) ábrák is szemléltetnek. Hasonló eredményt ad, ha a Doppler összefüggésben (5.3. egyenlet) az 5.6. egyenlet szerint számolt sebességfüggvényt a megfigyelő sebességének tekintjük, álló forrást feltételezve. Ennek később az akusztikai szimulációban lesz szerepe.



5.6. ábra: Doppler effektusból származó frekvenciamoduláció 0,5 m sugarú körpálya esetében



5.7. ábra: Doppler effektusból származó frekvenciamoduláció 3 m sugarú körpálya esetében

A szinuszos frekvenciamoduláció a zenében ismeretes „vibrato” effekt hatását kelti, önmagában még szintén nem kielégítő a Leslie-hangszóó szimulációjának tekintetében. A frekvenciamodulációt szintén beépítettem a plugin-be, a reális értékek között változtatható r és ω_L paraméterekkel (10.1.).

A két moduláció együttes jelenléte már emlékeztetett a Leslie-hangszóó jellegzetes hangzására, pontosabban a korábban használt régebbi, alacsonyabb árkategóriájú szintetizátoraim jellegzetes Leslie szimulációjára. A két moduláció azonos frekvenciával való használata különösen jó eredményt produkált, eltérő frekvenciákkal pedig sikerült valamelyest azt a hatást kelteni, amit a valóságban a két hangszóó sebességeinek pontatlansága okoz. A két egyszerű modulációval létrehozott szimuláció eredményéből kiderült, hogy a Leslie-hangszóó valóság-hű szimulációjához további munkára, más modellezési módszerre van szükség.

5.3 Leslie szimuláció akusztikai végeelem módszerrel

5.3.1 Akusztikai végeelem módszer

Az akusztikai végeelem módszer a fizikai alapú hangszintézis (3.1.4. fejezet) egyik elterjedt módszere. Zárt terek modellezésére, akusztikai térszámítási feladatok megoldására alkalmas, a véges tartományra felírt parciális differenciálegyenletek megoldásával. [18] Akusztikai térszámítás alatt a hangtér leírását értjük a tér akusztikai jellemzőivel. Megértéséhez a hangkeltés fizikai magyarázata szükséges.

A hang forrása valamilyen mechanikailag rezgésbe hozott test. A test rezgésbe hozza a környezetében lévő részecskéket, amely a levegőben (vagy egyéb közegben) hullámként terjed tovább. A rezgésbe hozott részecskék sebessége megváltozik, ezáltal a tér egyes pontjaiban a légnyomás is eltér a nyugalmi állapotban mért értékektől. Az emberi fül ezt a fizikai jelenséget érzékeli hangnak. A hangtér tehát a hangnyomásnak nevezett nyugalmi nyomástól való eltéréssel, és a közeg részecskéinek sebességével jellemezhető. [19]

Nyugalmi állapotban a hangteret leíró akusztikai hullámgyenlet időtartománybeli alakja a következő:

$$\nabla^2 p(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (5.8)$$

ahol ∇ a nabla operátor, t az idő, c a hanghullám terjedési sebessége, $p(\mathbf{x}, t)$ az adott helyen és időben kialakuló hangnyomás, ahol \mathbf{x} az Ω n -dimenziós tér eleme. Fourier-transzformációval áttérve a frekvenciatartományba megkapjuk a harmonikus gerjesztésekre értelmezett Helmholtz-egyenletet [18]:

$$\nabla^2 \hat{p}(\mathbf{x}, \omega) - \frac{(j\omega)^2}{c^2} \hat{p}(\mathbf{x}, \omega) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (5.9)$$

$$(\nabla^2 + k^2) \cdot \hat{p}(\mathbf{x}, \omega) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (5.10)$$

ahol ω a körfrekvencia, $\hat{p}(\mathbf{x}, \omega)$ a hangnyomás komplex értéke a hely és a körfrekvencia függvényében, k pedig az úgynevezett hullámszám:

$$k = \frac{\omega}{c}. \quad (5.11)$$

A hangtér modellezése a gyakorlatban a térrész véges számú, véges kiterjedésű elemre osztásával lehetséges, innen a végelem elnevezés, továbbá az eljárás használhatóságához a fent leírt egyenletrendszer valamilyen közelítő, becsülő egyszerűsítésére van szükség. Ennek megoldása a keresett nyomásfüggvények közelítése véges számú meghatározott alakfüggvény lineáris kombinációjával. Így egy adott ponthoz tartozó nyomásérték a következőképpen számolható:

$$p(\mathbf{x}) \approx \sum_i N_i(\mathbf{x}) p_i, \quad (5.12)$$

ahol N_i az alakfüggvényeket jelenti, p_i pedig az egyes alakfüggvényekhez tartozó nyomáskomponensek súlyait. Az úgynevezett gyenge alakban felírt Helmholtz-egyenlet az (5.12) közelítés alkalmazásával felírható mátrixos formában, amelyből a megfelelő behelyettesítésekkel [18] a nyomásértékeket meghatározó lineáris egyenletrendszer szintén megadható mátrixos alakban:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{p} = -i\omega \mathbf{q}, \quad (5.13)$$

ahol \mathbf{K} az akusztikai merevségi mátrix, \mathbf{M} az akusztikai tömegmátrix, ezek együttesen a rendszer mátrixok, illetve a \mathbf{p} vektor tartalmazza az egyes pontok nyomásértékeit, vagyis az (5.12) egyenletben megjelenő p_i súlyokat. Az egyenlet jobb oldala a rendszergerjesztése, ahol \mathbf{q} a gerjesztés vektor, ami az $\mathbf{A}\mathbf{v}$ szorzatként áll elő. \mathbf{A} a gerjesztő mátrix, \mathbf{v} pedig a pontokhoz tartozó részecske sebességek normális komponensét tárolja.

5.3.2 Az akusztikai modellezés fejlesztői környezete

Végeselem módszerrel történő akusztikai modellezésre a Matlab NiHu toolbox kiegészítő eszköztára ad lehetőséget [20]. Segítségével tetszőleges geometriájú zárt térháló (mesh) hozható létre. Például egy hangszer geometriája megalkotható egyszerű vonalakból vagy többdimenziós elemi alakzatokból (vonal, kör, gömb, négyzet, kocka...), illetve ezek tükrözésével, forgatásával, másolásával, kombinálásával, vagy egyszerűen grafikai programban megalkotott kész geometria importálásával. A térháló kicsiny elemekből (elements) és csomópontokból (nodes) épül fel. Az elemek kétdimenziós modell esetén általában négyszög vagy háromszög alakzatok, ezekkel lehet a teret a leghatékonyabban felosztani. Az elemméret megadásával tetszőleges felbontású háló valósítható meg, illetve megadhatóak az anyagjellemző paraméterek: a közeg sűrűsége, és a hullámterjedési sebesség. Néhány egyszerű paranccsal meghatározhatjuk a rendszermátrixokat és gerjesztő mátrixot, a kiválasztott csomópontokra gerjesztést adhatunk meg, ebből pedig kiszámítható az egyes csomópontokban kialakuló nyomásfüggvény az időtartományban és a frekvenciatartományban. A frekvenciatartománybeli megoldás az (5.13) egyenlet szerint számolható, az időtartománybeli számításokra pedig a dolgozatban nem volt szükség.

5.3.3 A hangtér kialakítása

5.3.3.1 Nyílt tér létrehozása

Ugyan a Leslie két forgó hangszórója egy zárt faladában helyezkedik el, a hangot a láda nyílásain keresztül a nyílt térbe sugározza. A faláda geometriájának figyelembevétele igen bonyolulttá tenné a modellezést, ezért a megvalósítandó rendszer egy szabadtérben forgó tölcser.

A végeselem módszer önmagában zárt terek modellezésére ad megoldást, de léteznek különböző eljárások nyílt térre való kiterjesztésre. [18] A NiHu eszköztárral lehetőség nyílik „végtelen elemek” létrehozására. A véges elem végtelen elemmel szomszédos éle (vagy háromdimenziós esetben felülete) visszaverődésektől mentes peremként viselkedik, így ehhez a peremhez érkező hullámok a végtelenbe haladnak tovább valamilyen csillapodással. Megadható a csillapítás becslésének pontossága a számítás során figyelembe vett polinom fokszámával. A zárt térháló határfelületére végtelen elemeket illesztve szimulálható a szabadtér, ekkor viszont a rendszer egy C

csillapítási mátrixszal bővül, a rendszeregyenlet (5.13) pedig a következőképpen módosul:

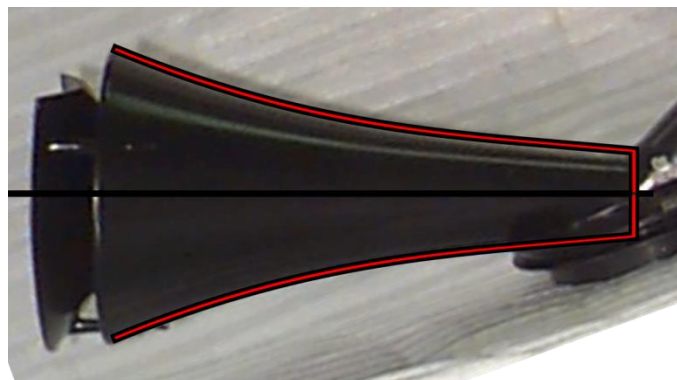
$$(K + i\omega C - \omega^2 M)p = -i\omega q. \quad (5.14)$$

5.3.3.2 Tölcsér modell

A fizikai modellezés legelső lépése a magas sugárzó tölcsér geometriájának megalkotása volt. A tölcsért a forgás síkjában kétdimenzióban modelleztem, így a tölcsér felülnézeti képének mását valósítottam meg, mivel forgás tengelyének megfelelő dimenzióknak a modellezni kívánt hatásokban nincs érdemi szerepük. A tölcsér íves formájának megalkotása a NiHu beépített elemi alakzataiból nehezen kivitelezhető, ezért az alakzatot az Inkscape nevű grafikai alkalmazás [21] alatt készítettem el. Az 5.8. ábra látható a modellezett magas sugárzó tölcsérpár, az 5.9. ábra mutatja a tölcsérrre illesztett ívet, az 5.10. ábra pedig a kész grafikát. A hengersizmetria miatt az oldalnézeti leképezés megegyezik a felülnézeti képpel, illetve elegendő volt az 5.10. ábra látható fél tölcsérfal megrajzolása, a végső geometria kialakítása pedig később a NiHu környezetben belül történik ezen alakzat transzformációjával. Megvalósítottam a tölcsér terelővel (5.1.1.) kiegészített verzióját is (5.11. ábra).



5.8. ábra: A modellezett tölcsérpár [K6]



5.9. ábra: A tölcsér megrajzolása



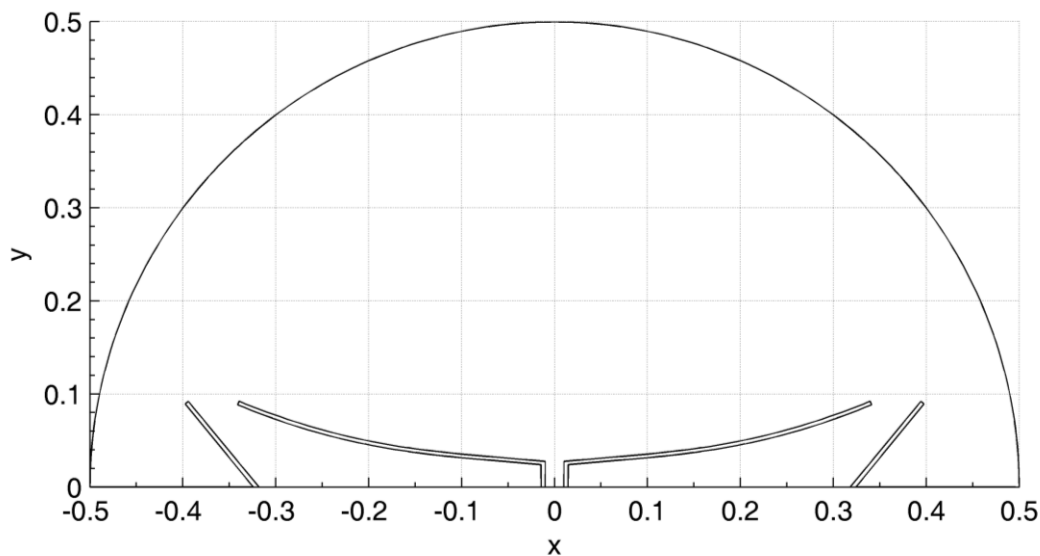
5.10. ábra: A kész tölcser grafika



5.11. ábra: Terelővel ellátott tölcser

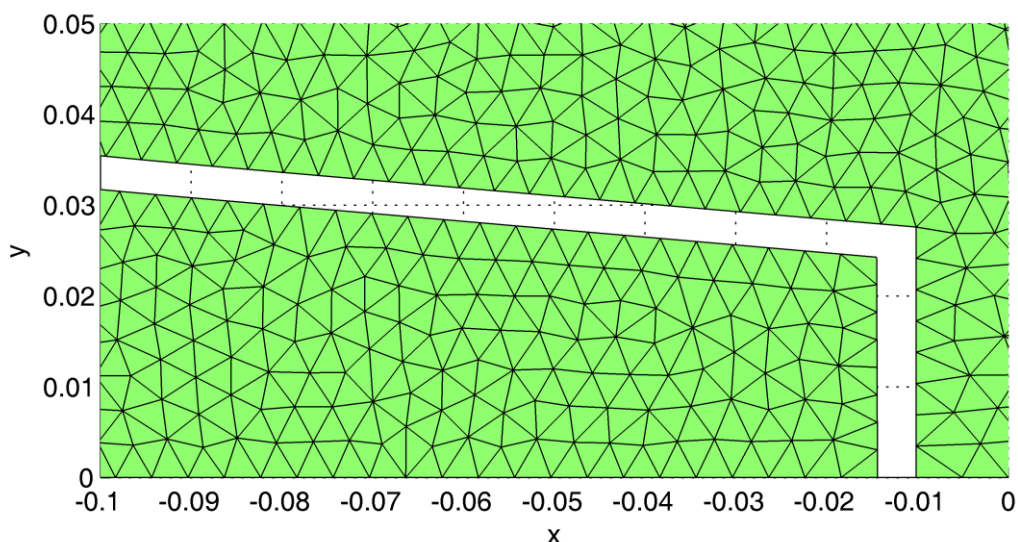
5.3.3.3 A térháló (mesh)

A tölcser a grafikai alkalmazásból kimentett *.eps* (encapsulated postscript) kiterjesztésű fájlból olvashatjuk be a Matlabba. A tölcser duplikálásával és elforgatásával kialakított tölcserpárt egy fél méter sugarú kör középpontjában helyeztem el, a kör peremére pedig a középpontból végtelen elemeket vetítve hoztam létre a nyílt teret. Végül, szimmetria okokból az egész objektum felét vettem, az 5.12. ábra szerint. A tér Matlab implementációja megtalálható a függelékben (10.2.3.1, 10.2.3.2.).



5.12. ábra: A hangtér

A tér x-tengelyre szimmetrikus fele a szimulációk során is szimmetrikusan, a meglévővel azonosan viselkedik, tulajdonképpen redundáns információkat tartalmaz, ezért elhagyható. Elhagyása nem befolyásolja a tér megmaradt részében végbemenő folyamatokat a modellezés szempontjából. A 5.13. ábra szemlélteti a tér apró elemekre és csomópontokra bontását, a „meshelést”.



5.13. ábra: A térháló (a bal oldali tölcsér torkának kinagyítása)

5.3.4 A hangtérszimuláció felhasználása

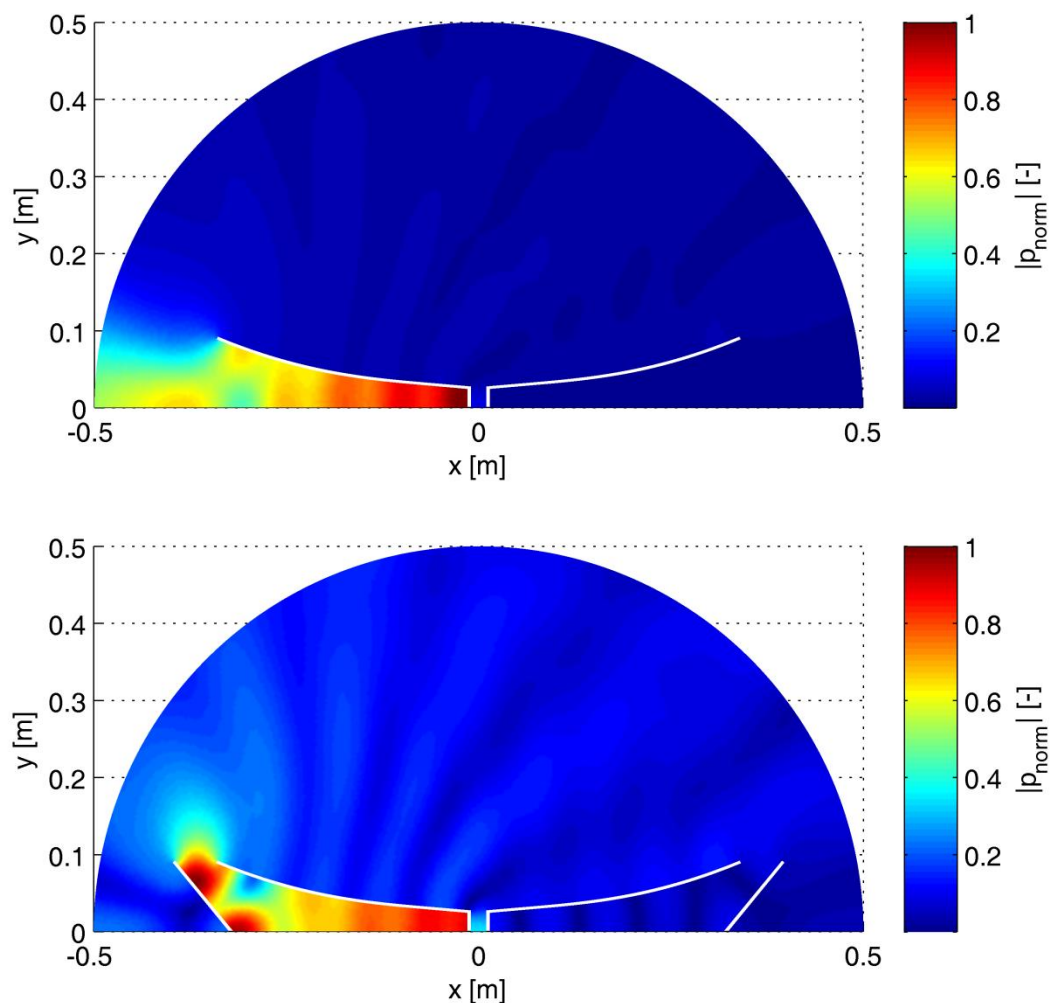
A térszimuláció objektumok mozgásának modellezését nem teszi lehetővé, ennek ellenére a hangkeltés szimulációja felhasználható a forgás modellezésére, ha azzal a ferdtéssel élünk, hogy a hangszóró és a megfigyelő relatív mozgását a megfigyelő álló hangszóró körüli körpályán való mozgása eredményezi. Ez a közelítés akkor elfogadható, ha a tölcsér kerületi sebessége lényegesen kisebb a hangsebességnél, ami a Leslie-hangszóró esetében természetesen fennáll. Továbbá az 5.2.2. pontban említésre került, hogy ez a változtatás a Doppler-effektus szerint a frekvenciamodulációban elhanyagolható különbséget jelent.

Kiszámolható a tölcsér torkában megadott egységnyi gerjesztés hatására kialakuló hangnyomás a tér pontjaiban. A frekvenciatartománybeli eredményekből megkapjuk a körpályát érintő csomópontok komplex nyomásainak abszolútértékét, és fázisszögét. Ebből meghatározható a hangszóró amplitúdó- és fázis-iránykarakterisztikája a különböző frekvenciákon, ezek pedig felhasználhatóak a pontosabb amplitúdó-, és frekvenciamoduláció megvalósításához.

Ehhez a rendszermátrixok meghatározása után (10.2.3.3.) meg kell adni a gerjesztés helyét a tölcsér torkának koordinátaival (10.2.3.4.), azután a megadott tartományba eső pontok gerjesztésének értékét, majd több frekvenciára megoldani a rendszeregyenlet (10.2.3.5.), végül az eredmények feldolgozásához kiválasztani a vizsgálat tárgyát képező fél méter sugarú kört.

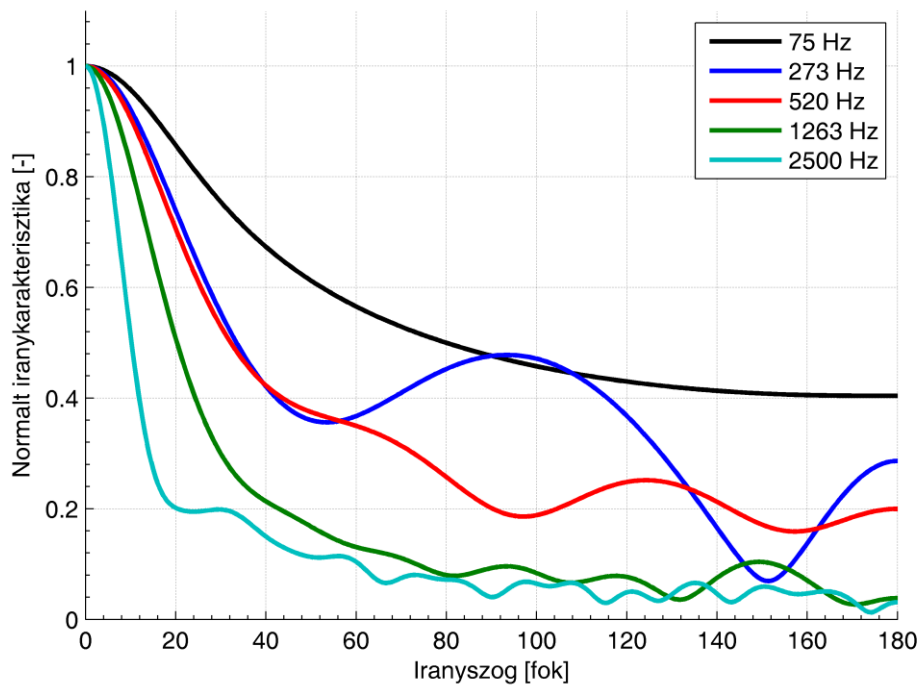
5.3.5 Eredmények

A modellben a választott elemméret 8 mm. Ezzel a felbontással összesen 51144 elem és 27870 csomópont alkotja a teret. Az elemméret bizonyos összefüggések alapján meghatároz egy maximális frekvenciát, melynél nagyobb frekvenciaérték esetén a frekvenciatartománybeli számítások már nem végezhetőek el. A maximális frekvencia esetünkben 5049,7 Hz-re adódott. A számításokat terelővel ellátott, és terelő nélküli esetre is elvégeztem, 200 tesztfrekvencián az 30 és 4200 Hz közé eső tartományon egyenletesen elosztva. Ez a tartomány lefedi a Hammond-orgona hangterjedelmét, és a kívül eső harmonikusok nagy részét. Az 5.14. ábra megfigyelhető a szimulált hangtér egy adott tesztfrekvencián (2,25 kHz). A tér peremére illeszkedő csomópontok eredményeinek feldolgozásával megkapható a hangszóró amplitúdó- és fázis-iránykarakterisztikája.

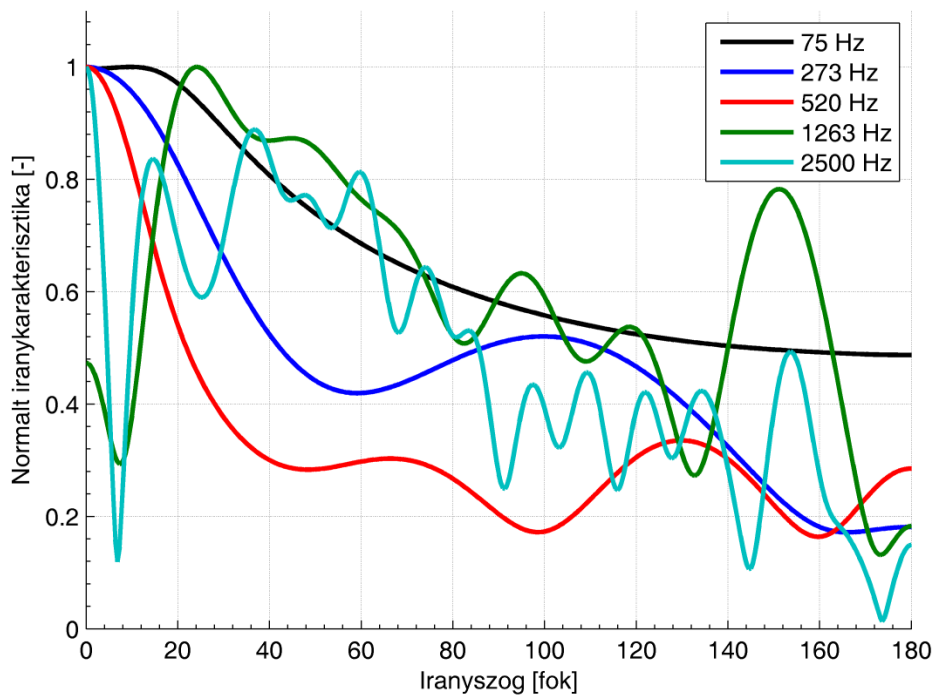


5.14. ábra: A szimulált hangtér 2,25 kHz frekvencián

5.3.5.1 Amplitúdó-iránykarakterisztika



5.15. ábra: Amplitúdó-iránykarakterisztika terelő nélkül



5.16. ábra: Amplitúdó-iránykarakterisztika terelővel

A terelő nélküli tölcsér esetén (5.15. ábra) minden tesztfrekvencián 0° a tölcsér főiránya, az ábrán az amplitúdóértékeket ebben a főirányban mért értékekkel normalizáltam. Az amplitúdó-iránykarakterisztika jól mutatja az amplitúdómodulációról elméletben elmondottakat. Látszik, hogy a magasabb frekvenciákon egyre meredekebben csökken, és egyre kisebb értékeket vesz fel az amplitúdó a 0° -tól távolodva, tehát sokkal erősebben érvényesül a moduláló hatás. Figyelemre méltó ezen kívül a 273 Hz-hez tartozó görbe kiemelkedő melléknyalábainak jelenléte. A karakterisztikák 180° és 360° között a 0° és 180° közötti görbék tükörképeivel folytatódnak. Az aktív tölcsér 0° esetén néz a hallgató irányába.

A terelővel kiegészített hangszóró izgalmas eredményekkel szolgált. Az iránykarakterisztika (5.16. ábra) alacsony frekvenciákon közel azonos, 500 Hz környékéig nem sokban különbözik a nyitott tölcsér karakterisztikájától. 1 kHz fölött azonban jelentős eltérés tapasztalható. Az amplitúdó erősen ingadozik, a görbét sűrű, szabálytalan hullámzások jellemzik. Megfigyelhető az is, hogy az amplitúdó maximális értéke nem feltétlenül a 0° -hoz tartozik, az 1,3 kHz-es görbe a maximumát 25° környékén veszi fel. A jelenség magyarázata, hogy a hang a tölcsér szájának szélén maradt szűk nyíláson, oldalirányban áramlik ki a tölcsérből.

A kapott eredményeket polárkoordináta-rendszerben ábrázolva össze tudtam hasonlítani a szakirodalomban [15] rendelkezésre álló iránykarakterisztikákkal (5.17. ábra).

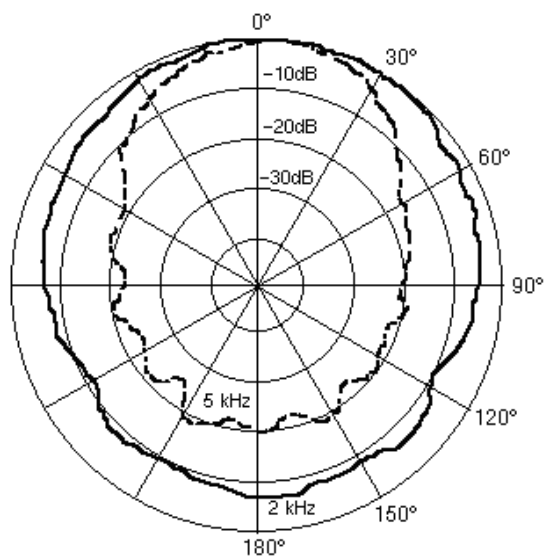


Figure 2. Typical polar response patterns of the Leslie Treble Rotor, with the defectors removed.

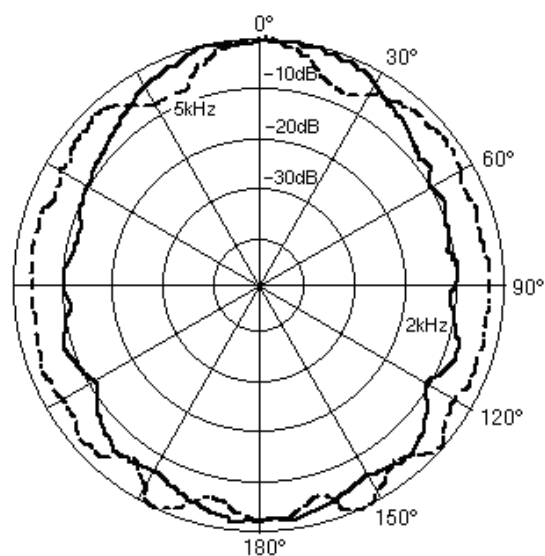
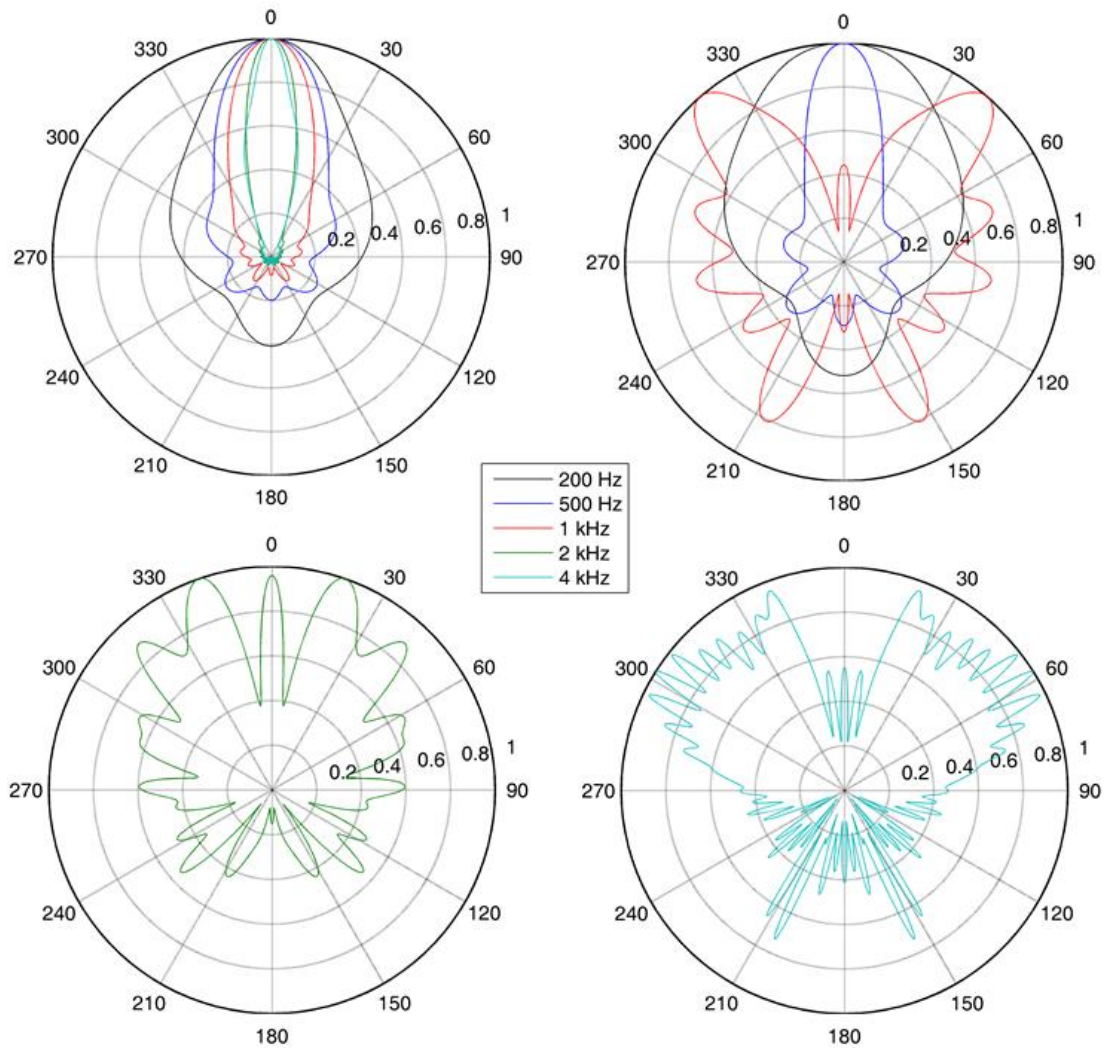


Figure 3. Typical polar response patterns of the Leslie Treble Rotor, with the defectors in place.

5.17. ábra: Jellegzetes iránykarakterisztika terelő nélküli és terelővel ellátott tölcsér esetében



5.18. ábra: A szimuláció eredményeiből számított iránykarakterisztikák

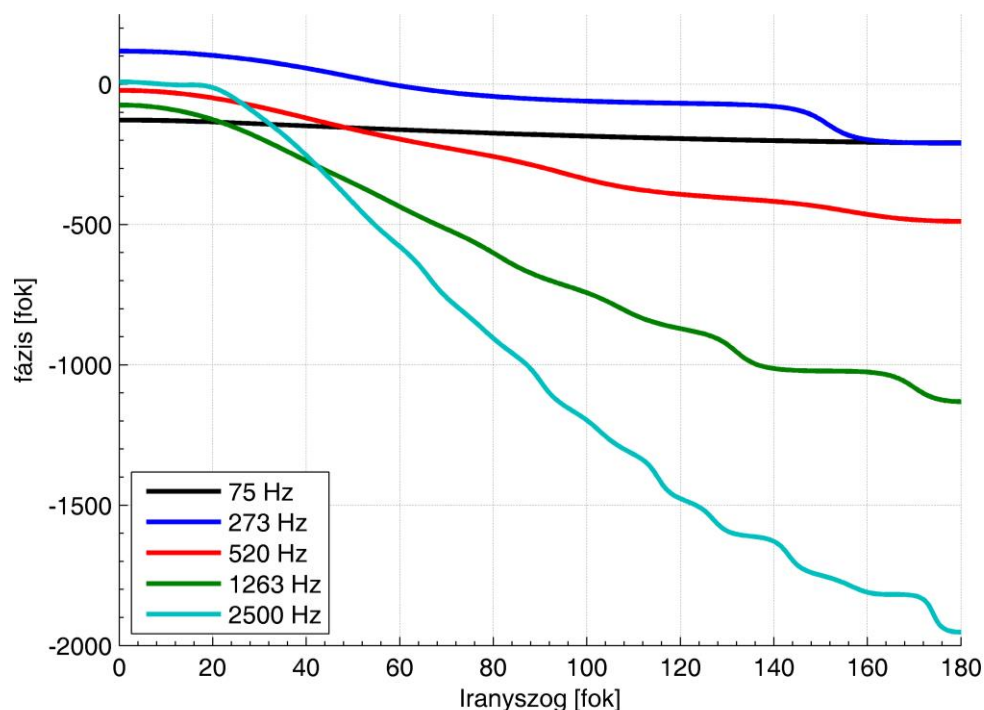
A 5.18. ábra bal felső sarkában elhelyezkedő polárkoordinátra-rendszerben a terelő nélküli tölcser iránykarakterisztikái láthatóak, a továbbiak pedig a terelővel ellátott esetre vonatkozó görbéket ábrázolják. A szakirodalomban található karakterisztikákon jól látható, hogy a terelő a kisugárzott hangot egyenletesebben szórja a tér minden irányába, míg a terelő nélküli esetben főként az alacsonyabb frekvenciákon a hang irányítottabbá válik. Szembetűnő, hogy a terelő nélküli esetben ez az irányultság a szimuláció eredményeiben jóval erőteljesebben van jelen. A terelő szóró hatása jól kivehető a szimulációk alapján is, ám a terelővel is kevésbé egyenletes iránykarakterisztikákat kaptunk a referenciához képest. Az összehasonlítást megnehezíti, hogy a referencia ábrán az iránykarakterisztikák dB-skálában adták, míg a saját eredmények lineárisan skálázott értékeket mutatnak.

Az eredményekből kiderül, hogy a forgás következtében létrejövő amplitúdómoduláció igen változatosan alakul a frekvencia függvényében. Ebből az is világossá válik, hogy a keresett hangzásban igen nagy szerepe lehet annak, hogy a hangot alkotó harmonikusok a frekvenciájuknak megfelelő különböző karakterű amplitúdómodulációval szólalnak meg. Ebben a hatásban pedig látszik, hogy jelentősen közrejátszik a terelő kúp jelenléte.

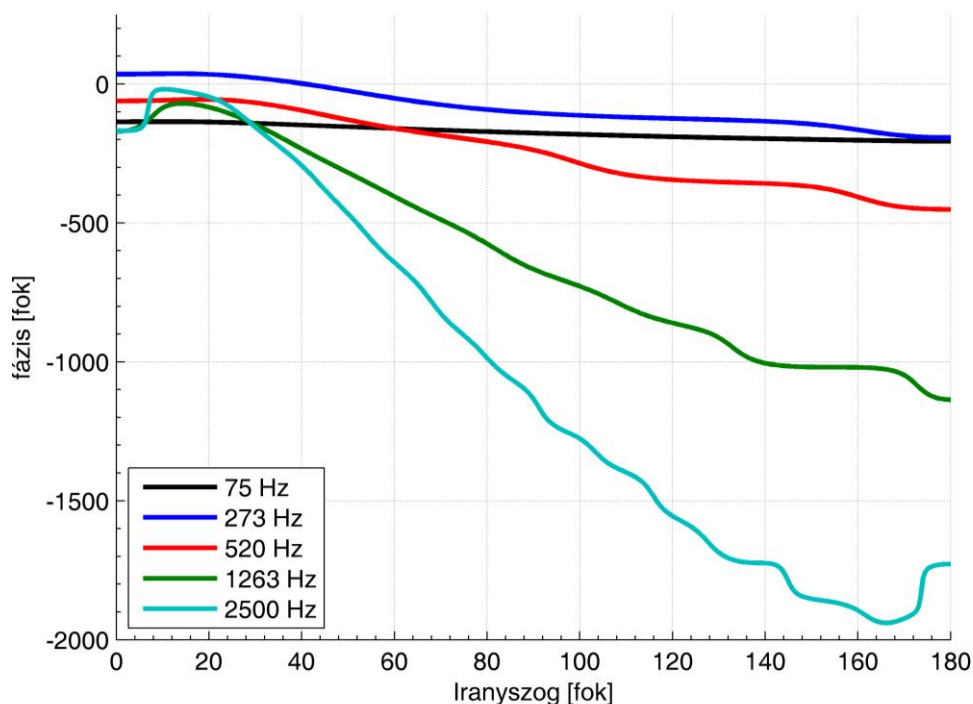
Matlabban implementáltam egy tesztmintát, amely az egyes harmonikusok amplitúdóját a kapott iránykarakterisztikák szerint modulálja. A minta is alátámasztotta, hogy sokat számít a pontos moduláció, és a harmonikusok külön kezelése. A tesztminta alapján úgy ítélem meg, hogy a szimulációt érdemes beépíteni a plugin-ba.

5.3.5.2 Fázis-iránykarakterisztika

A fázis-iránykarakteristikákból (5.19. ábra és 5.20. ábra) kiolvasható, hogy 0° -tól 180° felé haladva fázis értékek negatív irányban tolódnak el, ez igazolja, hogy a hangszóró távolodásakor a frekvencia alacsonyabbá válik. (A karakterisztika ebben az esetben is az amplitúdó-iránykarakterisztikánál leírt módon egészül ki 360° -ig, tehát a hangszóró közeledésekor a frekvencia növekszik.) A terelővel való kiegészítés a fázis-iránykarakterisztikában nem okoz lényeges különbséget az ábrák alapján.



5.19. ábra: Fázis-iránykarakterisztika terelő nélküli esetben



5.20. ábra: Fázis-iránykarakterisztika terelővel ellátott esetben

Az amplitúdó- és fázis-iránykarakterisztikákat együttesen tekintve összességében elmondható, hogy kissé eltúlzott eredmények születtek. Ennek lehetséges oka, hogy a szimulációt a hangszóró kis sugarú, közvetlen környezetében végeztük, a távolsági karakterisztika várhatóan eltér ettől valamelyest. Az 5.2. pontban leírtak is azt támasztják alá, hogy a hangszórótól távolodva a modulációs hatások csökkennek.

5.3.6 A szimuláció beépítése a VST plugin-ba

Elsőként tisztázni kell a szimuláció eredményeinek felhasználási módját. Adottak tehát a hangszórót körülvevő kör pontjainak amplitúdó és fázisértékei, az adott tesztfrekvenciákon. Minden ponthoz képest adott a hangszóró pozíciója (iránya), ami egy szöggel jellemezhető. Megfordítva, egy adott pillanatban (mintavételkor) a hangszóró állása, tehát szöge meghatározza a megfigyelő „felé néző pontot”, a hangminta pillanatnyi értéke pedig az e ponthoz tartozó amplitúdó súllyal súlyozandó, illetve a frekvenciamoduláció tekintetében a ponthoz tartozó fázisérték adódik a pillanatnyi fázishoz. A hangszóró pillanatnyi fázisszöge pedig meghatározható a forgás körfrekvenciájából. (A hangnyomás fázisa a későbbiekben és a programkódban φ illetve α néven szerepel, a hangszóró fázisszöge pedig a ϑ jelölést kapta.) A VST programban ezen eljárás szerint valósítottam meg a Leslie szimulációt.

Ehhez elsőként azt kellett megoldani, hogy a Matlab szimuláció eredményei átkerüljenek a VST-be. A különböző frekvenciákhoz és ϑ fázisszögekhez tartozó amplitúdó és fázisértékek egy bináris adatfájlban kerültek kimentésre. A meshelés következtében a kör szomszédos pontjai nem egyenlő távolságra helyezkednek el egymástól, így az egyes ϑ értékek sem egyenletes lépésközben követik egymást. Az adatok kezelhetőségének érdekében a kimentés előtt interpoláció segítségével az amplitúdó és fázis értékek egyenletes eloszlású ϑ értékekhez való igazítására volt szükség. Ezen kívül a fájl tartalmazza a tesztfrekvenciák és ϑ szögek számát is, hogy az adatok táblázatos formában kiolvashatóak legyenek (10.2.3.6.).

A VST programban a módosítások javarészt az eddig még nem említett `VoiceStatics` osztályban történtek. Ez az osztály felelős a program statikus változóinak tárolásáért és kezeléséért, például innen olvassa ki a `Voice` egy táblázatból a lenyomott billentyű hangmagasságához tartozó konstans frekvenciát. Két függvényt deklaráltam, az egyik az adatok beolvasásáért, a másik az adatok kiolvasásáért felelős. Az első függvény beolvassa a bináris adatokat és egy megfelelő méretű tömbben eltárolja azokat. Ezen kívül inicializálja a kiolvasáshoz szükséges változókat: a frekvenciák és ϑ szögek számát, a minimális és maximális frekvenciaértékeket, és a ϑ lépésközét. A kiolvasást végző függvény a megszólaló hang frekvenciájának, és a hangszóró fázisszögének függvényében a táblázat alapján visszaadja az aktuális amplitúdó és fázis értékeket. Természetesen megoldásra szorul, hogy a frekvencia és mintavételi pillanat által meghatározott ϑ igen csekély eséllyel egyezik meg pontosan a táblázat valamely sorával és oszlopával. A figyelembe veendő frekvencia meghatározása kvantálással történik, a visszaadott amplitúdó pedig a táblázatban adott ϑ értékek közötti interpolációval adódik. Kísérletet tettem lineáris interpolációra, de élvezhető minőségű végeredményt a köbös interpoláció adott.

A minta előállításáért felelős `Voice::process` függvényben a fent említett kiolvasást végző függvény meghívásával megkapjuk azokat az amplitúdó- és fázis értékeket, mellyel az alap minta módosítandó a Leslie szimuláció megvalósításához.

5.3.7 A szimuláció végleges formája a szintetizátorban

A Leslie-hangszóró akusztikai szimulációja a korábban ismertetett egyszerű modulációk mellett került bele a szintetizátorba, választható effektként. Opcionális a terelőkúp jelenléte, vezérelhető a hangszóró forgási sebessége, illetve külön állítható az amplitúdó-, és a frekvenciamoduláció jelenlétének mértéke, így tetszőleges arányban

keverhető a két komponens aránya. A két moduláció mértékét együttesen változtatva tulajdonképpen a hallgató hangszórótól való távolságát állítjuk, mivel a Doppler-effektusról leírtak értelmében a hangszórótól távolodva a modulációs hatások csökkennek. Ezen kívül az 5.1. fejezetben említett crossover szűrő alapértelmezett 800 Hz-es törésponti frekvenciáját is változtathatóvá tettem 0 és 1 kHz között. A kiválasztott frekvencia alatt a szimuláció hatása nem érvényesül. A Leslie szimuláció prioritást élvez az egyszerű modulációkkal szemben (AM, FM). A szimuláció bekapcsolt állapotában az egyszerű modulációk nem jutnak érvényre, automatikusan kikapcsolnak.

A szimulációban az amplitúdómoduláció a kívánt mértékben jelenik meg, a frekvenciamodulációt viszont eltúlzottnak tapasztaltam, melynek lehetséges okára az eredmények tanulmányozása során kitértem. A hangzás a fázis modulációjának legalább harmadrészére csökkentésével vált életszerűvé, így azt ezzel a módosítással építettem bele a végső szimulációba. A rendelkezésre álló paraméterek egyes beállításai mellett már igen valóságos hangzást lehet elérni. A terelő kúp jelenlétének fontossága bebizonyosodott, számomra a legmegfelelőbb hangzást a terelős szimuláció produkálja, nagyon kismértékű, mindössze 10-20 százalékos frekvenciamoduláció mellett, illetve az amplitúdómoduláció mértékét is valamelyest csökkentve.

6 Végeredmény

A végeredmény tehát egy Hammond-orgona szintetizátor, tetszőleges stúdiószoftverrel futtatható plugin formájában. A szintetizátor hangja a Hammond-orgona által keltett hangot reprodukálja a hangzásban nagy szerepet játszó Leslie-hangszóró hatásával kiegészítve. A szintetizátorban modellezésre került a hangszer hangját meghatározó valamennyi jelenség, melyek jellegzetes paraméterei vezérelhetők, minél nagyobb szabadságot nyújtva ezzel a felhasználónak a kívánt hangzás kialakításában. A Leslie-hangszóró esetében lehetőség van többféle verzió közül választani, melyek különböző modellezési módszer eredményeiként jöttek létre. Az elkészült plugin felülete a 6.1. ábra látható, melyen jól látszanak a vezérelhető paraméterek, kiválasztható effektek. A képen a plugin alapbeállításai láthatóak.



6.1. ábra: Az elkészült Hammond-orgona plugin grafikus felülete

6.1 Értékelés

A szintetizátor hangjával összességében elégedett vagyok, megközelíti a referenciának vett Hammond-orgona plugin hangzását. Az effektektől mentes, illetve a percussion-nel kiegészült hangzás kielégítő eredménnyel szolgált, mivel ezek analitikus szintézissel különösebb kihívás nélkül megvalósíthatóak.

A Leslie-hangszóró egyszerű analitikus modellezései tremolo és vibrato effektként megállják helyüket. Az akusztikai szimuláció ezeknél lényegesebben életszerűbb modellel szolgált, végeredményben emlékeztet a valóságban hallottakra. A Leslie-hangszóró szimulációja tehát, a jelenség modellezésének bonyolultságát figyelembe véve, szintén jó eredménnyel zárult. A referencia pluginban nincs forgó hangszóró szimuláció, ezért a végeredmény ezen részét nem tudtam összevetni vele.

6.2 Továbbfejlesztési lehetőségek

A projekt a Leslie-hangszóró modellezését tekintve sok lehetőséget nyújt a továbbfejlesztésre. Ezek között szerepel elsősorban a hangszóró álló helyzetből való felgyorsulásának modellezése a szimuláció bekapcsolásakor, ahogyan az a valóságban is történik. Ennek megvalósítását nem a kivitelezés nehézsége, hanem a rendelkezésre álló idő végeessége korlátozta. A fejlesztés során felmerült ezen kívül a hangszóró forgásának globális szinkronizálása az egyes megszólaltatott hangok esetében, jelenleg ugyanis a program a Leslie effektet minden leütött hang esetében külön kezeli, így több hang egyidejű megszólalásakor több különböző fázisú Leslie-hangszóró van jelen a mintában. További fejlesztési lehetőség a hangszórókat körülvevő faláda és hangnyílásainak figyelembevétele a hangtér-szimuláció során. Emellett még nagy szerepet tölthet be a sztereo hangzás által nyújtott lehetőségek kihasználása (panorámázás) a mozgó hangforrás modellezésében. Lehetséges ezen kívül a hangszóró bármilyen más, eddig még nem alkalmazott eljárással történő modellezése, amely pontosabb eredményekre vezethet. A Hammond hangzásnak népszerű kiegészítője még a torzító effekt használata, melynek megvalósítása jelen dolgozatnak nem képezte részét. Végül az egyedi grafikus felület fejlesztését érdemes még megemlíteni. A drawbar-ok és a hagyományos fa berakású hangszerfelület grafikus szimulációja általában része a Hammond-orgona pluginoknak.

7 Összegzés

A munkám egy Hammond-orgona szintetizátor megvalósítása volt, melyet sikeresen teljesítettem. Elsőként a rendelkezésre álló szakirodalmak áttekintésével megismerkedtem a hangszer működésével, és modellezési lehetőségeivel, majd ezek alapján modellt készítettem a hangszerről. A modellalkotás során gyakorlatot szereztem a Matlab fejlesztői környezet használatában.

Megismerkedtem a VST fogalmával, a VST plugin fejlesztés lehetőségével és módjával, majd az elsajátított ismeretek és az implementált modellek alapján megvalósítottam egy valós időben működő Hammond-orgona szintetizátort. Ez felelevenítette és fejlesztette a tanulmányaim alatt szerzett programozási készségemet.

Foglalkoztam a Leslie-hangszóró, tehát forgó hangsugárzórendszer szimulációjával. Ez szintén a témával kapcsolatos írások tanulmányozásával kezdődött. Megtudtam, melyek azok a jelenségek, amelyek szerepet játszanak a Leslie-hangszóró hatásában. Ezután kétféle módszerrel modelleztem a forgó hangszórót, egy egyszerűbb analitikus eljárással, és akusztikai végeelem módszerrel. Ehhez ismeretet szereztem a végeelem módszerben a modellezéshez szükséges részletességgel, majd alkalmaztam azt. A Leslie-hangszóró szimulációjának beépítésével létrehoztam a véglegesnek tekinthető plugint, végül javaslatot adtam a munkám továbbfejlesztésére.

Összegezve, átfogó képet kaptam a hangszintézisről, a feladatot érintő szintézis módszerek ismeretében, alkalmazásában pedig elmélyültem. Ezen kívül feladatom jelentős részét képezte a szoftverfejlesztés, programozás.

8 Köszönetnyilvánítás

Több mindenért köszönettel tartozom Rucz Péternek. Köszönöm a konzulensi tevékenységét, példátlan segítőkészségét, és nem utolsó sorban a lehetőséget, hogy a kedvenc hangszerem modellezéséről írhattam a szakdolgozatom, így öröm volt számomra a munka a kezdetektől fogva. A köszönet Moró Annának is szól, aki ajánlotta nekem Pétert. Köszönöm ezen kívül mindenkinek, aki bármilyen módon hozzájárult és támogatott egyetemi tanulmányaimban, ez pedig elsősorban a szüleimet illeti.

9 Irodalomjegyzék

- [1] Hammond USA, 2015, <http://hammondorganco.com/about-us/company-profile>
- [2] The Hammond Story, 2015,
<http://www.theatreorgans.com/grounds/docs/hamco.html>
- [3] The Hammond Organ is born, 2015,
<http://thehammondorganstory.com/chapterxiv.asp>
- [4] Jussi Pekonen, Tapani Pihlajamäki, and Vesa Välimäki, *Computationally Efficient Hammond Organ Synthesis*, Department of Signal Processing and Acoustics, Aalto University School of Electrical Engineering, Espoo, Finland, 14th int. conference on Digital Audio Effects, Paris, France, 2011.
- [5] Demjén Ádám, *Orgonahang-szintézis megvalósítása VST környezetben*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2009, pp. 21-24.
- [6] Stefan Bilbao, *Numerical Sound Synthesis: Finite Difference Schemes and Simulation in Musical Acoustics*, John Wiley and Sons Ltd, 2009, pp. 8-9.
- [7] Euthymia Electronic Organ V2 (Iliadis), 2015,
http://www.vst4free.com/free_vst.php?id=1346
- [8] Steinberg Company, Virtual Studio Technology, 2015,
<https://www.steinberg.net/en/company/technologies/vst3.html>
- [9] Wikipedia, Virtual Studio Technology, 2015,
http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_Studio_Technology
- [10] MIDI Manufacturers Association, 2015,
http://www.midi.org/aboutmidi/tut_protocol.php
- [11] Berki Péter, Dormány Balázs József, Juhász János, Molnár János Gábor, Papp János, *Zenegenerálás valós időben MIDI protokoll segítségével*, 2015,
<http://projectmidi.atw.hu/MIDI.pdf>

- [12] Steinberg, SDK (Software Development Kit), 2015,
<http://www.steinberg.net/en/company/developers.html>
- [13] Image Line, FL Studio, 2015, <http://www.image-line.com/flstudio>
- [14] Answers, Hammond organ, 2015,
<http://www.answers.com/topic/hammond-organ-1>
- [15] Clifford A. Henricksen, *Unearthing the Mysteries of the Leslie Cabinet*,
Recording Engineer/Producer Magazine , 1981.
<http://www.theatreorgans.com/hammond/faq/mystery/mystery.html>, 2015.
- [16] Ross Penniman, *A Rotary Speaker Modeling Plug-in*, 2014.
- [17] Julios O. Smith, Stefania Serafin, Jonathan Abel, Dave Berners,
Doppler Simulation and the Leslie, Center for Computer Research in Music and
Acoustics, Department of Music, Stanford University, Stanford, California, 2006,
pp. 1-10.
- [18] Olteán Bence, *Akusztikai térszámítás PML módszerrel*, TDK dolgozat,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2009,
2. fejezet, 3. fejezet.
- [19] Vas Mihány András, *Teremakusztikai modellezés végeselem módszerekkel*,
diplomaterv, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budaepeszt,
2008, 2. fejezet.
- [20] NiHu 1.1, 2015, <http://last.hit.bme.hu/nihu/index.html>
- [21] Inkscape, 2015, <https://inkscape.org/en>

9.1 Képek forrásai

- [K1] <http://www.soundonsound.com/sos/apr04/articles/hammondbakeoff.htm>
- [K2] <http://modularsynthesis.com/hammond/m3/m3.htm>
- [K3] <http://www.hammondjazz.com/drawbars.html>
- [K4] <http://www.mantor.info/leslie-page/>
- [K5] <https://www.nshos.com/LES4.htm>
- [K6] http://webuyhammonds.net/productdisplay.asp?ref=catalog.asp&ID_=1432&Email=&act=&cat=lp

10 Függelék

10.1 A szintetizátor vezérelhető paramétere

	Vezérelhető paraméter	Elnevezés a programkódban	Elnevezés a plugin felületén	Érték-tartomány	Kezdeti érték
Global/Drawbars	Fő hangerő	MasterVolume	Volume	0-1	0,5
	Alapharmonikus amplitúdója	SinusVolume	Fund	0-1	1
	Szubharmonikus amplitúdója	SubfundVolume	Subfund	0-1	1
	Kvint harmonikus amplitúdója	SubthirdVolume	Subthird	0-1	1
	2. harmonikus amplitúdója	SecondVolume	Second	0-1	1
	3. harmonikus amplitúdója	ThirdVolume	Third	0-1	0,5
	4. harmonikus amplitúdója	FourthVolume	Fourth	0-1	0,5
	5.harmonikus amplitúdója	FifthVolume	Fifth	0-1	0
	6. harmonikus amplitúdója	SixthVolume	Sixth	0-1	0
8. harmonikus amplitúdója	EighthVolume	Eighth	0-1	0	
Percussion	Percussion (on/off)	PercActive	Percussion	(on/off)	off
	Percussion hangerő	PercVolume	Volume	0-1	1
	Percussion harmonikus	PercN	Harmonic	2-12 (Z ⁺)	4
	Percussion feljutás	PercTUp	Attack	10-200 [ms]	30
	Percussion hossz	PercTHold	Length	100-500 [ms]	115
	Percussion elhalás	PercTauHold	S Decay	1-10 [s]	1
AM	Percussion lecsengés	PercTauRelease	Release	10-100 [ms]	50
	Amplitúdómoduláció (on/off)	AMActive	AM	(on/off)	off
	Modulációs frekvencia	AMfreq	Freq	0-10 [Hz]	7
FM	Modulációs mélység	AMdepth	Depth	0-25 [%]	20
	Frekvenciamoduláció (on/off)	FMActive	FM	(on/off)	off
	Modulációs frekvencia	FMfreq	Freq	0-10 [Hz]	7
Leslie	Mod. mélység (tölcsér hossz)	FMdepth	Depth	0.1-0.3 [m]	0.1
	Leslie szimuláció (on/off)	LeslieActive	Leslie Sim.	(on/off)	off
	Terelő kúp (on/off)	Diffuser	Diffuser	(on/off)	off
	Leslie forgási sebesség	LeslieSpeed	Speed	0-10 [Hz]	7
	Amplitúdómoduláció mértéke	AMPresence	AM pres	0-100 [%]	50
	Frekvenciamoduláció mértéke	FMPresence	FM pres	0-100 [%]	20
	Crossover frekvencia	Crossover	Cross	0-1000 [Hz]	375

10.2 Matlab Kódrészletek

10.2.1 Hammond-orgona modell

```
fs = 44100; % Mintaveteli frekvencia [Hz]
f0 = 520; % Alapfrekvencia [Hz]
T = 3; % Szimulált időtartam [s]
N = floor(fs * T); % Minták száma
t = (0 : N-1)/fs; % Idovektor

% Harmonikusok
harms = [0.5 1 1.5 2 3 4 5 6 8];
ampls = [0.5 1 1 1 1 1 0.5 0.5 0.5];

freqs = (f0 * harms).';
phase = 2*pi*freqs*t;
sample = ampls * sin(phase);

% ADSR burkoló
T_a = 0.05;
T_d = 0.05;
T_r = 0.1;
T_s = T - T_a - T_d - T_r;

tA = [0 T_a T_a+T_d T_a+T_d+T_s T];
A = [0 1.1 1 1 0];

adsr = interp1(tA, A, t, 'linear');

% Szorzás a burkolóval
sample = sample .* adsr;
```

10.2.2 Percussion modell

```
tunit = 1/fs; %időegység
f_perc = f0*6; %a percussion harmonikusa

%burkoló paraméterek:
at_time = 0.005; % attack időtartama
dec_time = 0.09; % decay időtartama
rel_tau = 0.005; % release időállandója
peak = 1.02; %attack csúcsértéke
a=1; %decay végértéke

M_at = peak/at_time; %attack meredekség
M_dec = (peak-a)/dec_time; %decay meredeksége

N_at = floor(at_time/tunit);
N_dec = floor(dec_time/tunit);
N_rel = N-N_at-N_dec;

At = (0: N_at-1)*M_at*tunit; %attack szakasz
dec = peak - (0 : N_dec-1)*M_dec*tunit; %decay szakasz
rel = a*exp( -((N_at+N_dec)*tunit*(0 : N_rel-1)*tunit)/rel_tau ); %
release szakasz

perc_env = [At, dec, rel];
```

```
perc = sin(2*pi*f_perc*t).*perc_env;
sample = sample+perc;
```

10.2.3 Leslie szimuláció

10.2.3.1 Térparaméterek deklarálása

```
% a_param.m
% Paraméterek megadása

clear;

% geometria file neve
eps_name = 'leslie_vegleges.eps';

% geometriai adatok
R = 0.5;           % Kulso kor sugara [m]
Le = 8e-3;        % Elemmeret [m]
tol = Le/100;

% anyagjellemzok
rho = 1.2;        % Suruseg [kg/m^3]
c = 343;          % Hangsebesség [m/s]

% vegtelen elem adatok
ie_P = 6;         % Fokszám

% minden változót mentünk
save('data/param');
```

10.2.3.2 Tér kialakítása

```
% b_meshing.m - halogeneralas
% A megadott eps alapján halot generalunk

clear;

% adatok betöltése
load('data/param');

% eps file beolvasása
% bb: bounding box
% path: beolvasott görbevonalak
[bb, path] = read_epspath(eps_name);

L_eps = bb(2,1) - bb(1,1);           % Az eps merete [?]
scale = R / L_eps;                   % Skalameret

mesh = meshpath(path, Le / scale);   % Vonalak a path-ból
mesh = scale_mesh(mesh, scale);      % Atskalazas
mesh = merge_coincident_nodes(mesh, 1e-4);

bb = boundingbox(mesh);
% Ugy allitjuk be, hogy a jobb also sarok legyen a (0,0)-ban
mesh = translate_mesh(mesh, [-bb(2,1), -bb(1,2), 0]);
% Vegleges skala (az eps bounding box-ja nem biztos, hogy pontos)
mesh = scale_mesh(mesh, R / (bb(2,1)-bb(1,1)));

% Kor illesztése
circ = create_circle_boundary(R, 4*ceil(R*pi/2/Le));
```

```

circ = drop_unused_nodes( ...
    mesh_section(circ, [-inf -tol -inf; tol inf inf]));

% Osszekapcsolas
mesh = join_meshes(mesh, circ);
% Tukrozes
mesh = join_meshes(mesh, reflect_mesh(mesh, [1 0 0]));
mesh = merge_coincident_nodes(mesh, tol);
% (Ezzel kesz a perem)

% Halozunk haromszogekekkel
fprintf('Running fill_polygon ... ');
mesh_2d = fill_polygon(mesh, Le);
fprintf('Ready.\n');

% Kivalasztjuk a kulso peremet
circ = get_boundary(mesh_2d);
[~, e_ind] = mesh_select(circ, sprintf('r > %.6f', R - tol));
% El kell dobni azokat az elemeket es csomopontokat, amik nem kellenek
circ.Elements = circ.Elements(e_ind,:);
circ = drop_unused_nodes(circ);

% Vegtelen elemeket vetitunk a kozeppontbol vetitunk
ie_mesh = project_ie_mesh(circ, ie_P, 'point', [0 0 0]);
% sorszam, IE = 2, fokszam, polinom-tipus (1 = lagrange),
% tomegmatrix-szamitas: 1 = kenyszeriti a zeros M matrixot
ie_mesh.Properties = [1 2 ie_P 1 1 0];

% A mesh-t a belso es a vegtelen elem mesh osszekapcsolasaval kapjuk
mesh_2d = join_meshes(mesh_2d, ie_mesh);
mesh_2d = merge_coincident_nodes(mesh_2d, tol);
mesh_2d = drop_mesh_IDs(mesh_2d); % csomopontokat
ujrasorszamozzuk

% Anyagjellemzok beallitasa
mesh_2d.Materials(1, 3) = rho;
mesh_2d.Materials(1, 4) = c;

k_max = min(mesh_kmax(mesh_2d, 12));
f_max = k_max * c / (2*pi);

fprintf('Maximal frequency: %.1f Hz.\n', f_max);

% Mentis: ezuttal csak az elkeszult 2D mesht mentjuk
save('data/mesh', 'mesh_2d');

```

10.2.3.3 Rendszer

```

% c_system.m
% A vegeselem matrixok összeallitasa

clear;

load('data/mesh');

[M, K, C, DOF] = model_mk(mesh_2d); % Rendszermatrixok
A = model_a(get_boundary(mesh_2d)); % Gerjesztomatrix

% Mentis (a DOF nem fog kelleni)
save('data/system', 'M', 'K', 'C', 'A');

```

10.2.3.4 Gerjesztés

```
% d_excitation.m
% A gerjesztes definicioja

clear;

load('data/mesh');

% A tolcses toroknak bounding box-ja
throat = [-0.015 0 0; -0.014 0.025 0];

% Kivalasztjuk az ott levo csomopontokat
exc_inds = mesh_select(mesh_2d, sprintf('x > %.6f & x < %.6f & y >
%.6f & y < %.6f', ...
    throat(1,1), throat(2,1), throat(1,2), throat(2,2)), 'ind');

save('data/excitation', 'exc_inds');
```

10.2.3.5 Frekvenciatartománybeli megoldás

```
% d_solution_freq.m
% megoldas a frekvenciatartomanyban

clear;

load('data/mesh');
load('data/system');
load('data/excitation');

% Frekvenciaskala
nFreq = 200;           % Tesztfrekik szama
fLow = 30;             % Also hatarfreki
fHigh = 4200;         % Felso hatarfreki

f_vec = linspace(fLow, fHigh, nFreq);

% Gerjesztes
v = zeros(size(mesh_2d.Nodes,1),1);   % Mindenhol 0
v(exc_inds) = 1;                       % Csak a toroknal 1

% Elore foglalunk a megoldasnak
p = zeros(size(mesh_2d.Nodes,1), nFreq);

for iFreq = 1 : nFreq
    % Aktualis korfrekvencia
    om = 2*pi*f_vec(iFreq);
    % Egyenletrendszer megoldasa
    p(:, iFreq) = (K + 1i*om*C - om^2*M) \ (-1i*om*A*v);

    progbar(1, nFreq, iFreq);
end

% Mentes
save('data/result', 'f_vec', 'p');
```

10.2.3.6 Eredmények exportálása

```
clear;

load data/param
```

```

load data/mesh
load data/result

% Megkeressuk a kulso koron levo pontokat
r_ind = mesh_select(mesh_2d, sprintf('r > %f & r < %f', R-tol, R+tol),
'ind');

% Iranyszog szamitasa
xy = mesh_2d.Nodes(r_ind, 2:3);
theta = atan2(xy(:,2), -xy(:,1));
% Rendezes
[theta, s] = sort(theta);
theta = [theta; pi+theta];
s = [s; flipud(s)];

[theta, it] = unique(theta);
s = s(it);

% Iranykarakterisztika normalasa
p_max = max(abs(p(r_ind, :)), [], 1);

D = bsxfun(@rdivide, p(r_ind, :), p_max);
D = D(s, :);

N_freq = size(D, 2);
N_theta = size(D, 1);

% Ujrainterpretalunk
N_theta = 720;
theta_new = linspace(0, 2*pi, N_theta+1);
theta_new = theta_new(1 : N_theta);

Dabs = interp1(theta, abs(D), theta_new, 'cubic', 'extrap');
Dphi = interp1(theta, unwrap(angle(D)), theta_new, 'cubic', 'extrap');

Dphi = bsxfun(@minus, Dphi, Dphi(1, :));

fid = fopen('dirchar_diff.dat', 'w');
fwrite(fid, N_freq, 'uint32');
fwrite(fid, N_theta, 'uint32');

fwrite(fid, f_vec(1), 'double');
fwrite(fid, f_vec(end), 'double');

fwrite(fid, Dabs, 'double');
fwrite(fid, Dphi, 'double');

fclose(fid);

```