

TDK-dolgozat

Zongora- és hegedűhang szintézisének lehetőségei

TDK dolgozat

Készítették:

Bank Balázs Lajos

Nagy Attila Balázs

V. éves villamosmérnök hallgatók.

Konzulensek:

dr. Augusztinovicz Fülöp docens, HIT

dr. Sujbert László adjunktus, MIT

1999

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	9
2. Alapvető hangszintézistechnikák	11
2.1. Additív szintézis	12
2.1.1. A szintézis alapelve	12
2.1.2. A szintézis minősége, használhatósága	12
2.1.3. A módszer továbbfejlesztései	13
2.2. Szubtraktív szintézis	14
2.2.1. A szintézis alapelve	14
2.2.2. A szintézis minősége, használhatósága	14
2.3. FM szintézis	15
2.3.1. A szintézis alapelve	15
2.3.2. A szintézis minősége, használhatósága	16
2.4. Mintavételezéses szintézis	16
2.4.1. A szintézis alapelve	16
2.4.2. A szintézis minősége, használhatósága	17
2.5. Fizikai modellezés	17
2.5.1. A szintézis alapelve	18
2.5.2. A szintézis minősége, használhatósága	18
2.6. Összefoglalás	18
3. Fizikai modell alapú szintézis	21
3.1. Történeti áttekintés	21
3.2. A hangszermodell	22
3.3. Az ideális húr waveguide modellje, rezonátoros struktúra	23
3.4. Nemideális húr, nemideális lezárás	27
3.5. A waveguide új interpretációja	30
4. A zongora	31
4.1. A mechanika és a kalapácsok	32
4.1.1. A mechanika	32
4.1.2. A kalapács	33
4.1.3. A kalapács viselkedésének vizsgálata	35
4.2. A zongora húrjai	36
4.2.1. Több húr rezgése, kétirányú transzverzális polarizáció	37

4.2.2.	Inharmonicitás	37
4.2.3.	Az inharmonicitás mérése	38
4.2.4.	Nemlineáris hatások, longitudinális hullámok	40
4.2.5.	A zongorahang spektruma	42
4.3.	A híd és a rezonátorlemez	44
4.3.1.	A rezonátorlemez mérése	44
4.4.	Pedálok	46
4.4.1.	A zengetőpedál hatásának vizsgálata	46
4.5.	Mitől zongora a zongora	47
5.	A zongorahang szintézise	49
5.1.	A kalapácsmodell	49
5.2.	A húrmodell	53
5.2.1.	A jel paramétereinek meghatározása	53
5.2.2.	Szűrőtervezés	56
5.2.3.	A veszteségi szűrő tervezése	56
5.2.4.	A diszperziós szűrő	58
5.2.5.	A törtrészkésleltető	61
5.3.	A sugárzó modellezése	61
5.4.	Az alapmodell kiegészítései	63
5.4.1.	Több húr figyelembevétele	63
5.4.2.	A hiányzó polarizációk	64
5.4.3.	A húr nemlinearitása	65
5.4.4.	Hangtompító	65
5.4.5.	Pedálok	65
5.4.6.	Véletlen hatások	66
5.4.7.	Az ideális zongoramodell	66
5.5.	Összefoglalás	67
6.	A hegedű	69
6.1.	A hegedűvonó és a vonás	71
6.1.1.	A jó hegedűvonóval szembeni követelmények	71
6.1.2.	A vonás mint gerjesztés	72
6.2.	A húr rezgése, hangkeltés	75
6.2.1.	A húr és rezgése	75
6.2.2.	Vont húr rezgése	76
6.2.3.	Hangkeltés	76
6.3.	A láb és a test	77
6.3.1.	A láb	77
6.3.2.	A sordino hatása	78
6.3.3.	A test	78
6.4.	Mitől hegedű a hegedű	79

7. A hegedűhang szintézise	81
7.1. Jelmodell alapú szintézis	81
7.1.1. A modell egyszerűsítése és ennek hatásai	81
7.1.2. Szintéziskísérletek	83
7.2. A fizikai modellen alapuló szintézis	85
7.2.1. A vonásmodell	85
7.2.2. A húrmodell	86
7.2.3. A sugárzó modellezése	86
7.2.4. Átviteli függvény mérése mechanikus gerjesztéssel	87
7.2.5. Átviteli függvény mérése inverz módszerrel	88
7.2.6. Egyéb mérési lehetőségek	89
8. Összefoglalás	91
Irodalomjegyzék	95
Függelék	99
F.1. A zongora mérése	101
F.2. A hegedű mérése	103

1. fejezet

Bevezetés

A megismerés vágya egyidős az emberiséggel. Bár ez a megismerés kezdetben a természet jelenségeinek tanulmányozását jelentette, ahogy az ember alkotta tárgyak száma gyarapodott, a megismerés egy új formája jött létre. A mai tudományos életet tekintetbe véve természetesnek tűnik, hogy a létrehozott eszközök, berendezések átesnek a tervezés fázisán, ám ez nem volt mindig így. Hatalmas katedrálisokat emeltek csupán az elődök tapasztalataira támaszkodva, utánozhatatlan hangú hangszereket készítettek az ősök tanácsai és az előző próbálkozások eredményei alapján. Mi ez utóbbi kérdés misztikumának eredtünk a nyomába.

Az emberek többsége talán megelégszik azzal, hogy a hegedű és a zongora szól, működik, de a mérnöki szemléletmód szinte automatikussá teszi a „hogyan?” és a „miért?” kérdésének felvetését. Mi az, ami ezeknek a hangszereknek a hangját oly egyértelműen megkülönböztethetővé teszi más hangszerektől? Mely tényezők szükségesek a hangszer felismeréséhez, és melyek azok, amelyek inkább „csak” a hangszer minőségének megítélése szempontjából fontosak? Milyen fizikai alapelvek húzódnak meg a hangjelenségek mögött? Mekkora befolyással bír az az előadó a kialakult hangszínre? Léteznek-e olyan alapelvek, melyek szerint a hangszerek csoportjai (jelen esetben a tágabb értelemben vett húros hangszerek) hasonló módon tárgyalhatók? Dolgozatunk ezekre a kérdésekre keresi a választ, de ha lehet, még egyel tovább lép: az analízis méltó párjával, a szintézissel is megpróbálkozik. Ha sikerült megismerni a vizsgált hangszerek működésének alapjait, az eredmények alapján felépített modell értelemszerűen a hangjelenség bizonyos mértékű reprodukciójára is alkalmazható, ehhez azonban a modell paramétereinek gondos beállítására van szükség. Megfeleltetést kell tehát találni a való világ (a hangszer hangja) és a modell paramétereinek között. Ilyenformán az általunk javasolt analízis-szintézis struktúra egy modellillesztési feladatnak is tekinthető, a speciális körülmények figyelembevételével.

Dolgozatunk első fele a hagyományos, zenei hangokra alkalmazott analízis és szintézis módszereinek áttekintésével foglalkozik, melyek általános jellemzője, hogy a kialakult hangzás megismerésére és utánzására koncentrálnak, nem veszi figyelembe a hangot előállító struktúra (a hangszer) sajátosságait. Ezek a módszerek, éppen előző tulajdonságuk alapján, a nemparametrikus szintézis kategóriájába tartoznak. Rövid tárgyalásuk azonban korántsem haszontalan, mint látni fogjuk, több módszer visszatér a paraméteres szintézis elemeként.

A dolgozat gerincét a fizikai modell alapú hangszintézis egy lehetséges megvalósításának tárgyalása alkotja. Elvéből adódóan ez a módszer nem a jel, hanem a struktúra modellezésére törekszik. Hátránya, hogy így kevésbé általános (ugyanaz a modell nem alkalmazható két különböző hangszerre) és általában nagyobb számításgigénye a hagyományos módszereknél. Előnye viszont a nagyobb átlátás a szintézis folyamatára, míg pl. az additív szintézis során a változtatható paraméterek az egyes harmónikusok frekvenciái és amplitúdói, itt legtöbbször fizikailag interpretálható paraméterek jelennek meg: ilyen lehet a rezgő húr hossza, a vonó húzásának sebessége vagy a zongora kalapácsának tömege. Ezt továbbgondolva rálehetünk a fizikai modell alapú szintézis legnagyobb előnyére: a zenész beavatkozásának figyelembevétele itt játszi könnyedséggel megtehető, semmi mást nem kell tennünk, mint a zenész által változtatott fizikai paramétereket (pl. vonás sebessége) a modellünkben is megváltoztatni. Ismét az additív szintézis példájával élve, ott szinte megoldhatatlan feladatnak tűnik megfeleltetést találni a vonó sebessége és a harmonikusok változása között. Az utóbbi kétségtelen előnyöket nyújt az analízis során (hála a Fourier-transzformációnak), de a szintézis fázisában az előadóművész beavatkozásának figyelembevétele egyáltalán nem triviális feladat. A fizikai modellezés az analízis egyszerűségét áldozza fel az élethűség és rugalmasság oltárán, ez azonban nem jelent nagy hátrányt, hiszen az analízisre csak egyszer, a modellalkotáskor kerül sor. A dolgozat második fele a zongora és a hegedű működésének leírásával foglalkozik, egyrészt irodalmi forrásokra támaszkodva, másrészt saját mérési eredmények alapján. Megpróbálja összegyűjteni a két hangszer hangzása szempontjából fontos hatásokat, paramétereket, és megkeresni azokat, melyek a hangzás minőségének feláldozása nélkül elhanyagolhatóak. Dolgozatunknak nem célja az olyan, egyébként rendkívül érdekes és mindmáig megválaszolatlan kérdések tárgyalása, hogy pl. mi okozza az adott hangszerek (pl. hegedűk) hangzása közötti hatalmas eltéréseket. Inkább azokra a jellegzetes tulajdonságokra próbál meg koncentrálni, amelyek alapján mindenki felismeri, hogy a hangszer, ami éppen szól, az egy zongora. Annak a magyarázata, hogy a tapasztalt zongorista könnyedén megmondja, hogy amit hall, éppen egy Bösendorfer, vagy egy Steinway, túlmutat a dolgozat keretein, mindazonáltal az itt ismerttetett módszerek egy későbbi, ilyen irányú kutatás alapjait is képezhetik. A dolgozat lezárását a tárgyalt fizikai modellezés zongorára történő alkalmazásának bemutatása képezi, mely kitér a modell felépítésére, az általános elvekhez képesti, hangszerspecifikus kiegészítésekre és a modell paramétereinek meghatározására. Szintén itt kerülnek tárgyalásra a felmerült implementációs kérdések és az általános jelfeldolgozási problémák megoldásai. A befejező rész felcsillantja a hegedű modellezésének lehetőségét, bemutatja a fennálló korlátokat, végül az összefoglalás keretében értékeli az eddigi munka eredményeit és kitér a további kutatások irányvonalát.

2. fejezet

Alapvető hangszintézistechnikák

Az elektronikus hangkeltés története a 19. század második felére nyúlik vissza. Hermann von Helmholtz 1860 körül készítette az első elektromosan vezérelt „hangszert”, egy hangolható rezonátort. Igaz, tudományos vizsgálatok céljából, nem pedig zenei művek előadására.

Zenei célokra Elisha Gray 1876-ban építette az első elektromos hangkeltő eszközt, a „Musical Telegraph”-ot, amellyel acéllemezek rezgését tudták telefonvonalon keresztül továbbítani.

Eleinte az elektromos hangszerek mechanikus alkatrészt is tartalmaztak, igazi áttörést az elektroncső megjelenése jelentett. Így ugyanis lehetővé vált heterodin elven működő, állítható frekvenciájú oszcillátor készítése, sőt, az elektromos jel erősítésének problémája is megoldódott. A trióda atyja, Lee De Forest 1915-ben mutatta be elektroncsöves hangszerét, az „Audion Piano”-t. Megemlítenéd még Harald Bode és Laurens Hammond neve is (bár az utóbbi által készített orgonában elektro-mechanikus elven működő oszcillátorok voltak).

A következő lényeges változást a tranzisztor hozta. A korábbi nagy, vaskos hangszerek mérete csökkent, megbízhatóságuk, minőségük javult. Az elektroncsövek elvesztették vezető szerepüket a hangszintézisben. Hasonló jelentőségű volt az integrált áramkörök elterjedése a ‘60-as években. A szintetizátorok új generációja fejlődött ki, a nagy úttörők Robert Moog és Donald Buchla voltak.

A digitális technika, mint szinte minden más területen, az elektronikus hangszereknél is új távlatokat nyitott. Jó minőségű, összetett szintézismódszereket megvalósító termékek váltak mindenki számára elérhetővé. Az áramkörök egyre nagyobb sebessége, a memóriák kapacitásának növekedése azonban további fejlődést enged, lehetőséget adva magas hanghűségű szintézismódszerek kidolgozására, megvalósítására.

A kezdeti, igen elmés elektro-mechanikus szerkezeteket a technika fejlődésével felváltó bonyolult, tisztán elektronikus hangszerek többféle szintézismódszert alkalmaztak. Az évek során új módszereket találtak fel, de megmaradtak a régiiek is, hiszen mindegyik más-más előnnyel és hátránnyal rendelkezik. Közülük aszerint választhatunk, milyen hangot szeretnénk előállítani. Általános megoldást még nem dolgoztak ki. Ebben a fejezetben az alapvető, elterjedtebb módszereket ismertetjük.

2.1. Additív szintézis

A hangszer hangja, a beszéd és általában a környezetünkben előforduló összes hang összetett, nem tisztán szinuszos, az elektronikus oszcillátorok jele azonban igen. Lehetőségünk van viszont több oszcillátor jelét összeadni, és így létrehozni egy hangot.

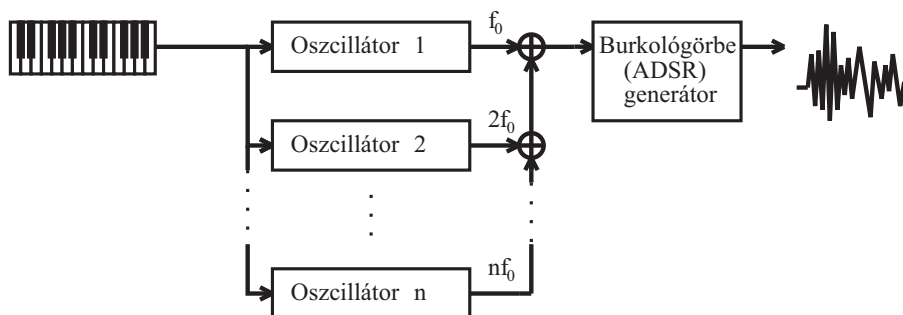
2.1.1. A szintézis alapelve

Tudjuk, hogy minden periodikus jel Fourier-sorba fejthető, azaz felírható f_0 alaph-frekvenciájú és ennek egész számú többszöröseinek megfelelő frekvenciájú, különböző amplitúdójú szinuszjelek összegeként. Ezen az elven működik az additív (összeadó) vagy más néven Fourier-szintézis.

A szintetizálni kívánt hangnak először meghatározzuk a spektrális komponenseit, vagyis a harmonikusok amplitúdóit és ezeket eltároljuk. Szintéziskor előállítunk egy szinuszjelet a kívánt alaph-frekvenciával, a felharmonikus komponenseket az adott amplitúdókkal, majd az így kapott jeleket összeadjuk.

Ahhoz, hogy a hang ne legyen túl gépies, burkológörbét illeszthetünk rá. A burkológörbe az amplitúdó változását adja meg az idő függvényében. Általában négy lineáris szakaszból áll (attack – felfutás, decay – visszaesés, sustain – kitartás és release – elengedés), amelyek paraméterei (időtartam vagy szint) állíthatóak. További finomításként alkalmazhatunk amplitúdó- és frekvenciamodulációt is, amivel tremolo ill. vibrato hatás érhető el.

A szintézis legegyszerűbb esetét a 2.1. ábra szemlélteti, ahol az egyes oszcillátorok a lenyomott billentyűhöz rendelt f_0 frekvencia egész számú többszöröseit állítják elő, az így kapott jelek összegére illesztjük a burkológörbét, nem külön-külön az egyes komponensekre, valamint nincsen további moduláció sem.



2.1. ábra. Az additív szintézis legegyszerűbb módja

2.1.2. A szintézis minősége, használhatósága

A szintézis láthatóan nagyon egyszerű, analóg áramkörökkel is könnyen, sokféle hang előállítható. Előszeretettel használják orgonahang ill. speciális, egyedi hangok létrehozására. Ezen az elven működtek a '60-as évek szintetizátorai. Egyszerű és jó

eredményt ad hangalak analízise is, a szintézis-struktúra könnyen felépíthető és robusztus (nincs vele gond, mint pl. a 3.3. fejezetben ismertetésre kerülő waveguide esetében). A módszer egyszerűségéből erednek hátrányai is. A hangszerek hangja sok felharmonikust tartalmaz, a valóságban ezek mindegyikéhez külön burkológörbe tartozik, saját felfutással és lecsengéssel, ezek együttes vezérlése problémát jelenthet. Másik hátránya, hogy a hangok analitikus feldolgozása során nehéz megfeleltetést találni a jelalak változása és a valódi hangszer vezérlési paraméterei között, így a tranziens folyamatok modellezése jelentős mértékben korlátozódik.

Leginkább tehát olyan hangoknál alkalmazható, amelyek jól jellemezhetők állandósult állapotukkal.

2.1.3. A módszer továbbfejlesztései

Az additív szintézis másik továbbfejlesztése a csoportszintézis, amely létrejöttéhez a digitális technika elengedhetetlen volt. Elve a következő:

Digitális úton tetszőleges jelalak egyszerűen létrehozható és tárolható. A szintetizálni kívánt hang komponenseit csoportokra bontva, a csoportokba tartozó komponenseket összeadva, majd ezek eredményét, mint új hullámformát tárolva, a szintézis során elég csak a csoportokat amplitúdóhelyesen összegezni, így a műveleti igényt lecsökkenthetjük. Ha a csoportot alkotó komponensek számát tovább növeljük, a módszer átvezet a mintavételezéses szintézishez (2.4).

Az additív szintézis finomításának, fejlesztésének létezik egy másik módja is, ha a modellezendő hangszer hangja felosztható berezgési, állandósult és lecsengési szakaszokra.

Ilyenkor keressük meg a hang spektrumában jelentős amplitúdójú komponenseket az állandósult szakasz alapján, ezután kövessük ezek amplitúdóváltozását a hang megszólalásától egészen elhalkulásának végéig. A teljes folyamatot bontsuk három részre: berezgés, tartás, lecsengés. A középső, tartás szakaszban a komponensek amplitúdója állandónak vehető, itt a hang ezen amplitúdókkal jellemezhető. A berezgési és lecsengési szakaszban pedig határozzuk meg minden egyes komponens burkolóját, majd az így kapott görbéket közelítsük IIR (Infinite Impulse Response, azaz végtelen impulzusválaszú) szűrőkkel. A hallható hangban azonban mindig jelen van valamilyen, a hangkeltésből eredő zaj, amit fülünk megszokott, igényel. A zajspektrum alapján modellezzük ezért a zajt is.

Ha minden, a hangszeren megszólaltatható hangra elvégezzük a fenti analízist, egy nagyméretű adatbázishoz jutunk, amelynek segítségével a hangszer hangját jó minőséggel szintetizálhatjuk. A szintézis menete az analízisből következik:

A leütött (kiválasztott) hanghoz tartozó adatok szerint először a berezgési, majd a kitarított szakaszt, illetve a felengedés (a hang vége) után a lecsengés szakaszt állítjuk elő, hasonlóan a hanghoz tartozó zajjal. A kettőt összeadva kapjuk a szintetizált hangot.

A módszer problémája a nagyméretű adatbázis létrehozása, kezelése, valamint a számítási igény, amit leginkább a felhangok számának korlátozásával csökkenthetünk.

Egy ezen az elven működő orgonaszintetizátor az eredeti hangtól füllel nehezen megkülönböztethető eredményt ad [Márkus99].

2.2. Szubtraktív szintézis

A szubtraktív (kivonó) szintézis az additív ellenkezője, amelynek során bonyolultabb jelalakokból kiindulva, szűrés útján állítunk elő hangot. Ezzel a módszerrel teljesen új hangokat alkothatunk, sőt, néhány hangszer esetében az additívhez képest jobb eredményt is kaphatunk.

2.2.1. A szintézis alapelve

Állítsunk elő az oszcillátorral felhangdúsabb, pl. háromszög-, fűrészfog- vagy négyszögjelet, így elég ez az egy, a hang alaphangfrekvenciáján működő oszcillátor ahhoz, hogy az összes harmonikus felhangot megkapjuk. A különböző hangszíneket ebből a nemkívánatos felhangok eltávolításával ill. alakításával, szűrők segítségével nyerhetjük. Szűrőként alkalmazhatunk alul- és felüláteresztőt, érdekesebb hatást érhetünk el azonban sáváteresztő és sávzáró szűrőkkel, valamint ezek tetszőleges kombinációjával.

2.2.2. A szintézis minősége, használhatósága

Ez a módszer is könnyen megvalósítható analóg áramkörökkel.

Szívesen használják elektromos orgonáknál, mert a dús felhangtartalmú sípoknál az állandósult állapotot jól közelítik. A kevesebb harmonikussal rendelkező regiszterek hangjának előállítására már problémásabb [Márkus99].

Mivel az emberi száj és szájüreg szűrőként viselkedik, a szubtraktív módszert beszédhang szintézisére is használják.

A moduláris felépítésű analóg szintetizátorok az additív és szubtraktív módszereket együttesen alkalmazták. Az építőelemek sorrendjének variálhatósága lehetővé tette szinte bármilyen struktúra megvalósítását. Ilyen elemek például a hangfrekvenciás, feszültségvezérelt oszcillátorok (Voltage Controlled Oscillator), kisméretű, feszültségvezérelt oszcillátorok (Low Frequency Oscillator), feszültségvezérelt szűrők és erősítők (Voltage Controlled Filter, Amplifier), a jelek kombinálását szolgáló keverők, stb.

A VCO-k szinuszos-, háromszög-, fűrészfog- és négyszögjeleket (szimmetrikus és aszimmetrikus), valamint szélessávú zajjelet szolgáltatnak. Lehetséges az oszcillátorok egymáshoz képesti elhangolása, így előállítható nem harmonikus felhangokból álló hang is, kisebb elhangolás esetén pedig kórus hatás érhető el.

Ezen szintetizátorok kezelését erősen nehezítette felépítésükből következően a kábelek mennyisége, ami komolyabb szintetizátor esetén áttekinthetetlen kábelerdőt eredményezett. Részben ezért is tudtak a digitális hangszeres megjelenésük után hamar elterjedni.

Vannak olyan modern szintetizátorok, amelyek a moduláris felépítést is támogatják, de a digitális működésnek köszönhetően konfigurálásuk egyszerű és áttekinthető.

2.3. FM szintézis

A digitális technika a '70-es évek közepére már komoly vetélytársként léphetett fel az analóg szintézisekkel szemben. Mivel azonban, ebben az időben a digitális rendszerek még nem voltak képesek nagyobb foksámú szűrők valós idejű futtatására, a klasszikus additív és szubtraktív szintézisek helyét egyéb, egyszerűbben megvalósítható módszerek vették át. Egyik ilyen módszer az FM szintézis.

2.3.1. A szintézis alapelve

Digitális oszcillátorokkal többféle hullámforma is könnyen előállítható.

Ezekből további, teljesen új hangokat hozhatunk létre, ha moduláljuk a jel amplitúdóját, frekvenciáját vagy fázisát.

Egy periodikus jel a következő általános alakban írható fel:

$$x(t) = A(t) \cos [2\pi f_c + \Theta_a(t)] \quad (2.1)$$

A használt moduláció típusa *amplitúdómoduláció* (AM), ha $A(t) = f_1[u(t)]$, *fázismoduláció* (PM), ha

$$\Theta_a(t) = f_2[u(t)],$$

és *frekvenciamoduláció* (FM), ha

$$\Theta_a'(t) = f_3[u(t)],$$

ahol $u(t)$ jelöli a moduláló jelet.

Az amplitúdómodulációt leginkább más szintézissel előállított hangok kiegészítő modulációjára alkalmazzák (pl. tremolo). A fázismoduláció nagyon hasonlít a frekvenciamodulációra, ami önálló szintézismódszernek is megfelel. A hasonlóság a frekvenciamoduláció képletéből is kitűnik:

$$y(t) = A(t) \sin [2\pi f_c t + I \sin(2\pi f_m t)] \quad (2.2)$$

Ez a *Bessel-függvények* segítségével a következő alakban is felírható:

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(I) \sin(2\pi(f_c + k f_m)t) \quad (2.3)$$

ahol J_k a k -adrendű Bessel-függvény, I a modulációs index. Komponensek csak $f_c \pm k f_m$ frekvenciákon lesznek, ahol f_c a vivő, f_m pedig a moduláló frekvencia [Fűrjes96].

Természetesen több modulátorból felépíthető bonyolultabb struktúra is, pl. egy lánc, a modulációk ismételt alkalmazásával. Alkalmazható visszacsatolás is, ennek során az oszcillátor saját magát, vagy a láncban előtte álló oszcillátort modulálja.

2.3.2. A szintézis minősége, használhatósága

Az algoritmus egyszerűsége ellenére is felharmonikusokban gazdag jelet produkál. Inharmonikus jelek előállítására, például harang modellezésére is alkalmas. A szintézissel alapvetően szintetikus és inharmonikus, lecsengő hangok, érdekes hangzások hozhatók létre, de akusztikus hangszerek modellezésére kevésbé alkalmas, mert az analízis nincs jól kidolgozva, ezért a paraméterek és a struktúra csak kísérletezés útján határozhatók meg [Fűrjes96].

2.4. Mintavételezéses szintézis

A memóriák kapacitásának és az áramkörök sebességének gyors növekedése lehetővé tette hangminták jó minőségű, digitális tárolását. Ez biztosította az alapot a PCM (Pulse Code Modulation) szintézis kialakulásához.

2.4.1. A szintézis alapelve

Egy akusztikus hangszer valóban élethű hangját úgy kaphatjuk meg, ha az eredeti hangot felvesszük és eltároljuk, majd ha arra szükség van, visszajátsszuk. Erre a célra a digitális tárolás teljesen megfelelőnek bizonyult. A létrejött hangból ezek után már csak elvenni tudunk, ezért a módszer egyfajta szubtraktív szintézisként is felfogható.

1963-ban – jóval a digitális korszak előtt – már bemutattak egy ilyen elven működő hangszert, a *Mellotron*-t. Ebben minden billentyűhöz tartozott egy-egy magnószalag, amire az eredeti hangot – leginkább vonósok hangját – rögzítették. Amikor a billentyűt lenyomták, a magnó lejátszotta a megfelelő felvételt, majd a billentyű felengedésével a magnófej visszatért a szalag elejére. Ezzel a működési elvvel megmaradtak a kitartott hang jellegzetességei, korlátot csak a szalagon tárolt hangminta hossza jelentett, ami általában 8 másodperc volt. Noha még így sem sikerült élethűen visszaadni a hangszerek hangját, a Mellotron nagyon kedvelt volt a rockzenészek körében.

Az alapelvet követve szükséges lenne különböző hangmagasság- és hangerő-értékek mindegyikéhez egy-egy regisztrátumot tárolni. Ennek megvalósítása még a mai memóriák mellett is nehézkes és drága. Ezért a hangregisztrátumok tárolásánál tömörítéseket alkalmaznak.

Az egyik ilyen tömörítés azon alapszik, hogy állandósult állapottal rendelkező hangok közel periodikus jelet generálnak. Elegendő tehát csak a berezgési tranziens és a stacioner szakasz néhány periódusának eltárolása. Utóbbit a berezgési szakasz lejátszása után ismételtetik (*Sustain Loop*), így áll elő a kitartott hang. Az ismétlések közötti sima átmenetet biztosítani kell, hogy a keletkezett hang ne „kattogjon”. Az ilyen elven működő szintézis a hullámtábla (Wavetable) szintézis.

A másik használt tömörítés azt feltételezi, hogy a hangszer hangja nem nagyon változik az alapfrekvencia függvényében, így nem szükséges az összes hanghoz külön

mintát tárolni. A hiányzó mintákat a meglévők rövidebb ill. gyorsabb visszajátszásával kaphatjuk meg.

Azt a modellezési eljárást, amely mindkét fent említett tömörítés előnyeit felhasználja, PCM-nek nevezik [Márkus99].

2.4.2. A szintézis minősége, használhatósága

A második tömörítés feltételezése csak durva közelítés, így egyszerűbb szintetizátoroknál, ahol oktávonként csak egy hang mintáit tárolják el (vagy még ennyit sem), a hangminőség gyenge, a hangok uniformizáltak.

A berezgési tranziensek erősen függenek a megszólaltatás módjától, egy mintasorozattal nem adhatók meg. Igényesebb megoldásoknál ezért minden hanghoz több mintát rögzítenek a megszólaltatás paraméterei (leütés erőssége, ill. sebessége) szerint.

A mai PCM szintetizátorokban szűrők is találhatóak, ezek paramétereinek (vágási/sávközépi frekvencia, jósági tényező) állításával az eredeti hang játék közbeni változása a paraméterek megfelelő megválasztásával modellezhető. A szűrőkre és a magára a jelre burkológörbék is illeszthetők, valamint egy LFO-val a hangmagasság, hangerő vagy akár a szűrőparaméterek is modulálhatóak. Ettől adhat a PCM igen jó eredményt. Az egyes burkológörbék a dinamikától függenek, pl. nagyobb leütés esetén a szűrő vágási frekvenciája magasabb, ezért a zongora hangja élesebb lesz. A szűrők, burkolók paraméterei analitikus úton meghatározhatók, az eredmények a hullámtáblában eltárolhatók, szintéziskor a megfelelő adatok alapján a hang könnyen előállítható.

Nagyszámú minta tárolása és modulációk alkalmazásával jó minőségű hangszintézis hozható létre. Zongorahang visszaadásának kedvelt módja, napjaink legszebb hangú elektromos zongorái ezen az elven működnek. Vonószekari hangzás esetén a PCM szintézis nagyon jó eredményt ad, mert a sok hangszer hangja „átlagolódik”, a hangszínváltozások szerepe és hatása lecsökken, néhány paraméterrel kézbeartathatóvá válik. Szólóhegedű (és egyéb szóló vonós hangszer) esetében a paraméterek száma elég nagy, ezek kezelése, valós idejű állítása okoz gondot, noha a szintézis, alapelvéből következően, lehetővé tenné az élethű hangszintézist. Az ebből eredő élettelensége miatt vetődhet fel más, jobb minőségű hangszintézis megalkotására.

Egyik legnagyobb előnye minden más szintézissel szemben pedig az, hogy megfelelő hardver-támogatással számításgénye – és ennek megfelelően költsége is – igen kicsire redukálható.

2.5. Fizikai modellezés

Az eddig említett szintézisekben közös, hogy mind a hangszer hangját modellezzik, az eredeti hangot vizsgálják az elektronikus jelgenerálásban alkalmazott módszerek variációival próbálják valóságosabban visszaadni.

2.5.1. A szintézis alapelve

A fizikai modellezés a fenti szintézisekkel szemben nem a hangot magát, hanem a hang keletkezését próbálja modellezni. Ehhez feltételezni kell, hogy a hangszer fizikai jellemzői és hangja között egyértelmű leképezés áll fenn, valamint a hang és a fizikai modell paramétereit között is található hasonló transzformáció [Fürjes96].

A modell segítségével keletkező hangok nem függetlenek egymástól, hanem – mint az eredeti hangszernél – egymás keletkezésének körülményeit befolyásolják. A hangszer fizikai működésén alapuló szintézissel így lehetőségünk nyílik valóság-hű hang létrehozására, az összes, a hangformáláshoz szükséges paraméter biztosítása mellett.

A fizikai szintézishez a hangszer modelljét kell megalkotnunk úgy, hogy az valós időben is működtethető legyen. Ez a feltétel nagyon erős, hogy teljesüljön, a modell egyszerűsítésével kell élnünk.

A hangkeltés folyamata általában részekre osztható. A részek külön-külön modellezhetők, ami jelentős könnyítést is adhat. Szükséges még az egyes részek közötti kapcsolat modellezése, ez rendszerint igen összetett, visszacsatolásokat is tartalmaz. Egy célszerű felosztás lehet például a következő:

- **Gerjesztő tag** – itt történik a gerjesztés, vezérlés,
- **Rezgésformáló tag, vagy rezonátor** – a hangszer felépítésének figyelembevétele,
- **Kicsatoló tag** – a rendszer kimenete.

A szintézisprogram a működtető hardver képességeinek figyelembevétele mellett a matematikai összefüggések alapján megírható.

2.5.2. A szintézis minősége, használhatósága

A valóság-hű hangvisszaadásnak csak a modell minősége szab határt, így ezzel a szintézissel elméletileg igényeinknek megfelelő hang előállítása is lehetséges. A játék során a fizikai modell követi a gerjesztés paramétereinek változását, a tranziensek, apró finomságok nem vesznek el.

Sajnos, komoly problémát jelent a modell paramétereinek meghatározása. Egyelőre még nem létezik olyan általános eljárás, amivel bármely hangszerre ezek egyértelműen meghatározhatók lennének. További probléma a szintézis számításigénye, ami egyszerű modell esetében is igen nagy. Az algoritmusok valós időbeni megvalósíthatósága a mai jelfeldolgozó processzorokkal is kérdéses.

A fizikai modellen alapuló szintézist a következő fejezetben részletesen ismertetjük.

2.6. Összefoglalás

Az általunk választott két hangszer, a zongora és a hegedű hangja összetett, több paramétertől függ. Nem jellemezhető tehát egy-egy hangjának stacioner szakaszából

nyert információkkal, a tranziensek mellőzésével. Ezért nem alkalmazható sem az additív, sem a szubtraktív módszer egyszerű változata. Kizárható továbbá az FM szintézis is. Mint említettük, napjaink PCM szintetizátorai mind a hegedű, mind a zongora esetében már elfogadható hangminőséget produkálnak, korlátot csak a vezérelhetőség jelent. A fizikai modellen alapuló szintézis feltehetően kielégítő eredményt adhat, a módszert alkalmazó szintetizátorok azonban még nem túl elterjedtek, az általuk használt modellek kezdetlegesek.

3. fejezet

Fizikai modell alapú szintézis

3.1. Történeti áttekintés

A fizikai modellezés gyökerei mélyre nyúlnak vissza: a rezgő- és hullámmozgás alapjait már a 18. században ismerték, századunk elején pedig megjelentek az eszközök a hangszerek viselkedésének vizsgálatára. Az analízis eredményeinek szintézis céljából történő felhasználása azonban a számítógépek megjelenéséig váratott magára. A '70-es évek elejének első próbálkozásai után a '80-as évek végén, '90-es évek elején vett újabb lendületet a téma kutatása. Ez egyrészt a személyi számítógépek sebes-növekedésének köszönhető, másrészt pedig annak, hogy ezekben az években jelent meg egy számítási szempontból nagyon hatékony módszer, az általunk is használt, és a későbbiekben ismertetésre kerülő *waveguide* modellezés [Smith92].

A fizikai modellezés egy lehetséges útja a rezgő objektumot leíró differenciálegyenletek numerikus megoldása, *Hiller* és *Ruiz* [Hiller71] a rezgő húr mozgását szimulálta *véges differenciálok* módszerével. Ennek a megközelítésnek az előnye, hogy az elődök munkájának köszönhetően rendszerint már rendelkezésre álló egyenletek közvetlenül algoritmussá alakíthatók, hátránya viszont a rendkívül nagy számítási igény. Ez okból kifolyólag a módszer a mai napig sem alkalmas valós idejű szintézis megvalósítására, de bizonyos fizikai jelenségek vizsgálatánál rugalmassága miatt jó szolgálatot tehet.

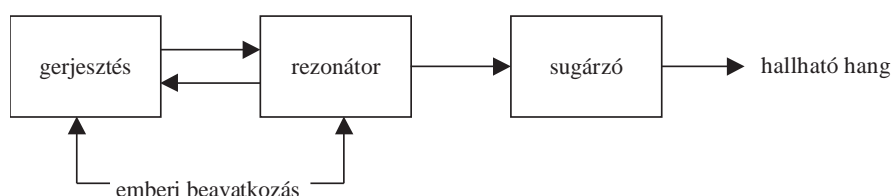
A '70-es évek végén *Cadoz*, *Luciani* és *Florens* egy másik megközelítést alkalmaztak. *CORDIS*-nak keresztelt rendszerük a hangszert mint egymáshoz rugókkal és csillapítókkal kapcsolódó tömegpontokat modellezte [De Poli 92]. Ez a módszer leginkább a mechanikai rezgések vizsgálatánál jól bevált véges elem módszerhez (FEM) hasonlítható.

A párizsi *IRCAM* kutatói egy harmadik megoldást választottak: a rendszer mozgását módusokra bontva a szintézist csillapított rezgőkörök jelének összegzéséből nyerik [De Poli 92]. A módszer előnye az általánosság (ebből a szempontból eltér a többi fizikai modelltől, az irodalom mégis ide sorolja), és az a tény, hogy a móduselemzés már elég kiforrott technikának tekinthető. Egy hangszer analízise pár nap alatt elvégezhető, egyszerűbb esetekben pedig a modális paraméterek akár a hangszert leíró differenciálegyenletekből is meghatározhatók.

Az általunk is használt *waveguide* modellezés a folytonos hullámegyenlet megoldását diszkrétizálja, tehát nem magát a hullámegyenletet (ahogy a véges differenciálok módszere teszi) és nem is a frekvenciatartománybeli megoldást (ami pedig a modális szintézis alapja). A hangszer rendszertехnikai részekre bontása után ezt a módszert vizsgáljuk.

3.2. A hangszermodell

Vizsgálatunkat nagyban megkönnyíti, ha hangszerünket funkcionális elemeire bontjuk (3.1. ábra): első ilyen elem a *gerjesztés*, ez lehet kalapácsütés, vonó húzás vagy egy csőbe történő levegőbefúvás. Az így kialakult „jel” (valamilyen fizikai mennyiség) egy olyan egységbe kerül, amely meghatározza a rendszer frekvenciáit, módusait, bizonyos ideig tárolja a rezgési energiát. Ilyen *rezonátor* lehet a húr vagy a levegőoszlop. Az így felépülő rezgési energia kicsatolásáért a *sugárzó* a felelős. A fúvós hangszereknél ez ugyan nem választható el egyértelműen a rezonátortól, de a húros hangszereknél a szétválasztás megtehető: ilyen a zongora rezonátorlemeze (sajnos, az irodalom szóhasználata megtévesztő, mert ez nem rezonátor) vagy a hegedű teste. A legfontosabb, negyedik komponensről sem feledkezhetünk meg: ez pedig az *emberi beavatkozás*. A művész legtöbbször a gerjesztést változtatja, de a rezonátor paramétereinek (pl. húr hosszának) változtatása sem ritka a hangszerek világában. A sugárzó módosítására leginkább a fúvós hangszereknél van mód (pl. a franciakürtnél a művész jobb kezét a kürt nyílásába helyezi), bár az a rezonátorra is hatással van. A hang alaphfrekvenciáját tehát a rezonátor határozza meg, a gerjesztés és a sugárzó a hang más időbeli és spektrális jellemzőiért felelős.



3.1. ábra. A modell felosztása

Rendszertехnikai tárgyalás szempontjából az a legegyszerűbb, ha az egyes egységek közötti interakciót egyirányúnak tekintjük, a gyakorlatban ez azonban nem mindig tehető meg. A rezonátor és a sugárzó közötti kölcsönhatás jó közelítéssel egyirányúnak és lineárisnak tekinthető, feltéve, hogy a rezonátor paramétereinek beállításánál figyelembe vesszük a sugárzó hatását (pl. a húr által látott impedanciát). Ez a gerjesztés esetében nem tehető meg ilyen egyszerűen, mivel az minden esetben nemlineáris kölcsönhatás következtében jön létre. Előfordul, hogy ez viszonylag kevés áldozat árán linearizálható, mint ahogy azt *Smith* a vonós hangszerek [Smith93], és a zongora [Smith95], [Van Duyne 95] esetében megmutatta, de nem tehető meg az általánosság feláldozása nélkül (ilyenkor a gerjesztést a bemeneti fizikai változókból

nekünk kell „kitalálni”, a modell ezt nem végzi el automatikusan), ugyanakkor számottevő számítástechnikai előnyöket nyújthat. Általános esetben tehát a gerjesztés és a rezonátor egy egymással kétirányban összekapcsolt alrendszernek tekinthető, amely kimeneti jele a sugárzóra jut. A sugárzó pedig a legtöbb esetben egy lineáris szűrővel modellezhető.

3.3. Az ideális húr waveguide modellje, rezonátoros struktúra

Az ideális húr egyenletének felírásánál egyszerűsítő feltételek sorára van szükségünk. A húr végtelennek kell tekintenünk (mint látni fogjuk, ez később feloldható), anyagát és a benne ébredő húrirányú feszültséget homogénnek, a rajta terjedő hullámok alakját pedig kellően lankásnak ($dy/dx \ll 1$). A húr mozgásából csak egy transzverzális polarizációt veszünk figyelembe. Az így felírható hullámegyenlet levezetése az irodalomban megtalálható [Morse48], [Fletcher98], végeredményként a jól ismert (hasonlóan pl. a távvezetékhez és a rudak longitudinális rezgéséhez) egydimenziós hullámegyenletet kapjuk:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad c = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (3.1)$$

ahol x a vizsgált pont pozíciója a húr mentén, y a transzverzális (húrra merőleges) kitérés, t az idő, T a húrra ható feszítőerő, μ az egységnyi hosszra eső tömeg és c a hullám terjedési sebessége. Látható, hogy a húr adott pontjának gyorsulása a húr ugyanazon pontbeli görbületével arányos. Ennek a differenciálegyenletnek minden olyan haladóhullám megoldása, amely mozgása során megtartja alakját. Mivel mindkét irány megengedett, az általános megoldás két ellentétes irányba haladó hullám szuperpozíciója:

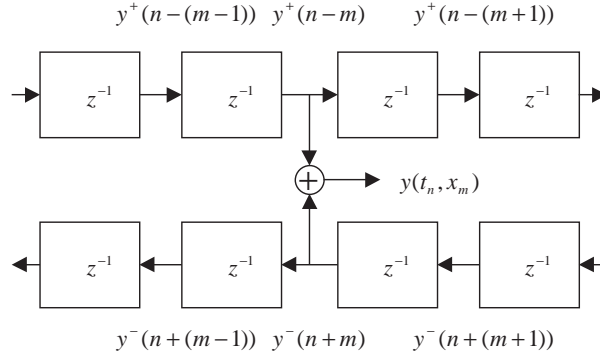
$$\begin{aligned} y(x, t) &= f^+(ct - x) + f^-(ct + x) \\ v(x, t) &= \frac{dy}{dt} = c \frac{df^+}{dt}(ct - x) + c \frac{df^-}{dt}(ct + x) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Ezek az egyenletek egyben megadják a két hullám választásának módszerét is: a két komponens (f^+ és f^-) a húr egy adott t időpontbeli kitérése (alakja) és sebessége mint kezdeti feltétel, egyértelműen meghatározza.

Az általános megoldás időbeli és térbeli mintavételezése minden olyan f függvények esetén megtehető, amelyek teljesítik a Nyquist-feltételt. Ez esetben a hullámalak a térben és időben mintavett pontok között interpolálva mindig visszaállítható. Ha a mintavételezést úgy végezzük, hogy az egyes komponensek egy időbeli ütem alatt pontosan egy csomópontnyit mozduljanak el, az ideális waveguide modellhez jutunk [Smith92]:

$$y(t_n, x_m) = y^+(n - m) + y^-(n + m) \quad (3.3)$$

Ez felfogható két, egymással szemben haladó végtelen hosszú késleltetővonalnak, ahol a húr aktuális kitérését két egymás feletti késleltető-kimenet összegeként kapjuk. Ennek blokkdiagramja látható a 3.2. ábrán.



3.2. ábra. A waveguide alapkonceptiója

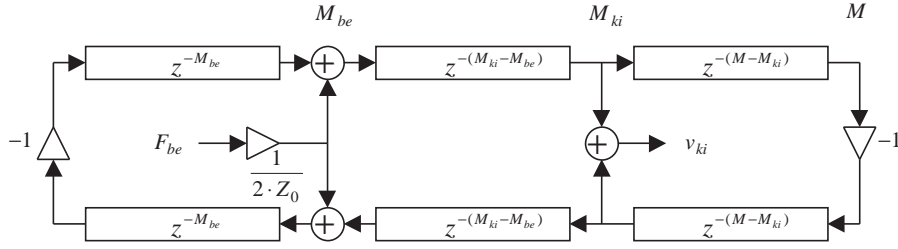
A húr linearitása miatt megtehető, hogy az egyes késleltetővonalainkba más változókat képzelünk, ilyen lehet a kitérés sebessége, gyorsulása, a húr meredeksége, görbülete és így a húrra ható erő is. Ezek egytől-egyig kielégítik a hullámegyenletet. Figyelmünket érdemes a kitérés sebessége (v) és a húr adott pontjára ható transzverzális erő (F) felé fordítani: ezen haladóhullámok között ugyanis az ideális húron egyenes arányosság áll fenn. A húr hullámimpedanciája:

$$Z_0 = \frac{F^+}{v^+} = -\frac{F^-}{v^-} \quad Z_0 = \sqrt{T\mu} \quad (3.4)$$

Ez a távvezetékhez hasonlóan a húr bármely pozíciójára és bármely időpillanatban igaz. A hullámimpedancia ismeretében könnyedén meg tudjuk mondani, mi történik, ha a húrt egy Z impedanciával zárjuk le. A távvezetékkel analóg módon itt is reflexió lép fel, amelynek mértéke sebesség- és erőhullámokra a következőképpen alakul:

$$r_v = \frac{v^-(x_{1ez}, t)}{v^+(x_{1ez}, t)} = \frac{Z_0 - Z}{Z_0 + Z} \quad r_f = \frac{F^-(x_{1ez}, t)}{F^+(x_{1ez}, t)} = -r_v = \frac{Z - Z_0}{Z_0 + Z} \quad (3.5)$$

Az ideálisan merev lezárás végtelen Z impedanciának felel meg, eszerint a sebesség-hullámok azonos amplitúdóval de ellentétes előjellel, az erőhullámok azonos amplitúdóval és azonos előjellel verődnek vissza a lezárásról. Bár nincs gyakorlati jelentősége, a szemléletesség kedvéért érdemes a sebességet (v) változónak tekinteni, mert ilyenkor a húr kitérése időbeli integrálással megkapható. Szükségünk van még a húrra ható gerjesztő erő bejuttatására is: ha F erővel hatunk a húr adott pontjára, ott a húr sebessége v -vel megnövekszik, az egyes késleltetővonalakba jutó többlet sebesség $v_{be} = F_{be}/(2Z_0)$. Ezek alapján (hasonlóan az irodalomban található s -tartománybeli és a pengetett húrra vonatkozó tárgyaláshoz [Karjalainen98]) összeállíthatjuk ideális waveguide modellünket (3.3. ábra).



3.3. ábra. Az ideális húr waveguide modellje

Az erőt M_{be} pontban bejuttatva a sebesség az M_{ki} csomópontban:

$$v_{ki}(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} (1 - z^{-2M_{be}}) (1 - z^{-2(M-M_{ki})}) z^{-(M_{ki}-M_{be})} \frac{F_{be}}{2Z_0}$$

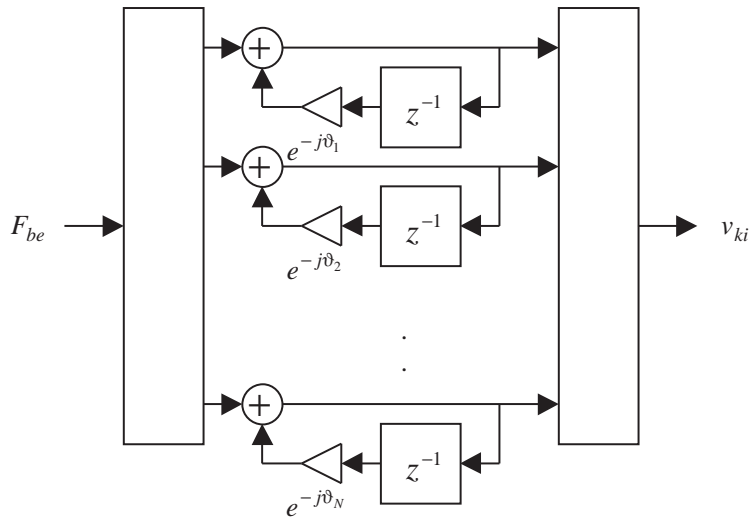
$$v_{ki}(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} H_{be}(z) H_{ki}(z) z^{-(M_{ki}-M_{be})} \frac{F_{be}}{2Z_0} \quad N = 2M \quad (3.6)$$

A középső tagot részlettörtekre bontva:

$$v_{ki}(z) = \frac{1}{N} \left\{ \frac{1}{1 - z^{-1}e^{-j\vartheta_1}} + \dots + \frac{1}{1 - z^{-1}e^{-j\vartheta_N}} \right\} \frac{F_{be}}{2Z_0} \times$$

$$\times H_{be}(z) H_{ki}(z) z^{-(M_{ki}-M_{be})} \quad \vartheta_k = \frac{2k\pi}{N} \quad (3.7)$$

Ez megfeleltethető két fésűszűrő közé beágyazott rezonátoros struktúrának is, amit a 3.4. ábra szemléltet.



3.4. ábra. Az ekvivalens rezonátoros struktúra

Látható, hogy a rezgés frekvenciáiért a rezonátoros struktúra a felelős, az ideális húr esetében az egységkörön fekvő pólusok határozzák meg a módusokat. A fésűsszűrők (egy kis késleltetésen kívül) csak a módusok amplitúdóit változtatják. Viselkedésük megfelel az általunk elvárt fizikai képnek: a húr pl. hetedrészénél gerjesztve ($M_{in}/M = 1/7$) minden $k \cdot 7$ -edik harmonikus amplitúdója zérus lesz. A kialakult amplitúdót ugyanígy befolyásolja a megfigyelés pozíciója.

A rezonátoros struktúra megvalósítási szempontból a waveguide alternatívája, ilyenkor a fésűsszűrők hatását a rezonátorok kimenetének amplitúdójával is figyelembe vehetjük (ez eddig minden esetben $1/N$ volt). Ebben az esetben a waveguide és a rezonátoros modell átviteli függvénye csak késleltetésben tér el egymástól, amely szükség esetén (pl. nemlineáris gerjesztés figyelembevételénél) egyszerűen kompenzálható.

$$\frac{v_{ki}(z)}{F_{be}(z)} = \frac{1}{2Z_0} \frac{1}{N} \left\{ \frac{a_1}{1 - z^{-1}e^{-j\vartheta_1}} + \dots + \frac{a_N}{1 - z^{-1}e^{-j\vartheta_N}} \right\} z^{-M}$$

$$a_k = 4 \sin(2k\pi \frac{M_{be}}{N}) \sin(2k\pi \frac{M - M_{ki}}{N}) \quad \vartheta_k = \frac{2k\pi}{N} \quad (3.8)$$

A waveguide modellünk vagy az alternatív rezonátoros struktúra segítségével tehát bármely időpillanatban ismerjük a húr bármely pontjának adott gerjesztésre (F_{be}) adott választát (v_{ki}). Ez így azonban csak a csomópontokra vonatkozik, a húr helyzetének meghatározásához a waveguide modellben csomópontok között *interpolációra* van szükség. Ezzel inverz operáció a *deinterpoláció*, ahol törtrészkesleltetők segítségével juttatják be a gerjesztést a csomópontok közé [Välimäki95], [Laakso96]. A rezonátoros struktúra előnye, hogy erre nincs szükség, mivel az tetszőleges valós M_{be} és M_{ki} paraméterek mellett az elvből adódóan helyes eredményt ad.

A rendszer linearitásából következően a *nem pontszerű gerjesztés* is modellezhető, azt térben mintavételezve és egymás melletti csomópontokban bejuttatva a késleltetővonalakba. A rezonátorok kimeneti együtthatói ilyenkor is egyszerűen (a szuperpozíció elve alapján) számolhatók, ha azonban az egyes térben elosztott gerjesztések nem csak egy konstans szorzóban különböznek, akkor minden egyes elemi gerjesztéshez más és más bemeneti együtthatót kell rendelnünk, azaz a bemeneti vektor mátrix alakot vesz fel (tehát egy *MISO* rendszert kapunk). Az esetek többségében szerencsére élhetünk a pontszerű gerjesztés feltételezésével. Ha ez valamilyen oknál fogva nem tehető meg, akkor is jó közelítést jelent az, ha a skalár gerjesztőjelünket egy térbeli súlyozófüggvénnyel terítjük szét a waveguide-on. Ilyenkor az egyes elemi gerjesztések egymás konstansszorosai lesznek, tehát továbbra is használható az egyszerű, egybemenetes struktúra.

A húros hangszerek szimulációjánál nem elsősorban a húr mozgására vagyunk kíváncsiak, hanem a lezárásra (híd, láb) ható erőre, hiszen az energia kicsatolása a lezáráson keresztül történik (A húr és a levegő rossz impedanciaillesztése miatt a húr által levegőbe lesugárzott energiától eltekinthetünk). A hídra ható erő meghatározható (3.5) felhasználásával az alábbi képletekkel (a mennyiségek a lezárásnál értendők):

$$\begin{aligned}
F^+ &= v^+ Z_0 \\
F^- &= r_f F^+ = r_f v^+ Z_0 \\
F_{\text{hid}} &= F^+ + F^- = (1 + r_f) Z_0 v^+ = 2Z_0 v^+
\end{aligned} \tag{3.9}$$

A teljes átviteli függvény:

$$\frac{F_{\text{hid}}}{F_{\text{be}}} = \frac{1}{1 - z^{-N}} (1 - z^{-2M_{\text{be}}}) z^{-(M - M_{\text{be}})} \tag{3.10}$$

Ilyenkor a rezonátor a_k együtthatói a következő alakot veszik fel:

$$\begin{aligned}
\frac{F_{\text{hid}}}{F_{\text{be}}} &= \frac{1}{N} \left\{ \frac{a_1}{1 - z^{-1} e^{-j\vartheta_1}} + \dots + \frac{a_N}{1 - z^{-1} e^{-j\vartheta_N}} \right\} z^{-M} \\
a_k &= 2 \sin(2k\pi \frac{M_{\text{be}}}{N}) \quad \vartheta_k = \frac{2k\pi}{N}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

3.4. Nemideális húr, nemideális lezárás

A megértés szempontjából célszerűbb először a lezárás idealitását feloldani. Tetszőleges frekvenciafüggetlen (rezisztív) Z impedanciát a húr végére képzelve és (3.5)-be behelyettesítve r_v -re szintén frekvenciafüggetlen értéket kapunk, de ez abszolút értékben kisebb lesz 1-nél. A késleltetővonalakban utazó hullámok tehát mindkét lezáráson egy-egy konstanssal szorozódnak, azaz az egyes harmonikusuk azonos időállandóval, exponenciálisan csillapodnak. Az egyszerűség kedvéért tételezzük fel, hogy csak a húr egyik végét zárjuk le véges (azaz nem ideálisan merev) impedanciával (Ha mindkét lezárás véges impedanciájú, a képletekbe a két r_f szorzatát kell helyettesíteni). Ez esetben a lecsengési idő kifejezése a következő alakot ölti:

$$\tau = \frac{1}{f_0 \ln r_f} \quad r_f = -r_v \quad f_0 = \frac{N}{f_s} \tag{3.12}$$

ahol f_0 a húr alapfrekvenciája, f_s pedig a mintavételezési frekvencia. Az ekvivalens rezonátoros struktúra annyiban változik meg, hogy a pólusok az egységkörről az origó felé vándorolnak:

$$\begin{aligned}
\frac{F_{\text{hid}}}{F_{\text{be}}} &= \frac{1}{N} \left\{ \frac{a_1}{1 - p_1 e^{-j\vartheta_1}} + \dots + \frac{a_N}{1 - p_N e^{-j\vartheta_N}} \right\} z^{-M} \\
p_1 = \dots = p_N &= (r_f)^{-\frac{1}{2N}} \quad \vartheta_k = \frac{2k\pi}{N}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Ha a húr képzeltben egy olyan impedanciával zárjuk le, amelynek nagysága frekvenciafüggő, viszont értéke valós (fázisa mindenütt nulla), a lecsengési idő értékét és az ekvivalens rezonátoros struktúra pólusait közelítőleg hasonló módon számíthatjuk (3.5), (3.12) és (3.13) segítségével. Ha pl. a nagyobb frekvenciák felé a lezáró

impedancia csökken, a lecsengési idők is csökkenni fognak (Ha $r_v(z)$ meredeksége közel nulla, a módusfrekvenciák nem térnek el jelentősen az ideális esetétől).

Ha bármilyen lezáró impedanciát megengedünk, nemcsak a lecsengési idők, hanem a módusfrekvenciák is megváltoznak. Szintén jó közelítés a létrejövő frekvenciákra:

$$\varphi(\vartheta_k) - \vartheta_k N = -2k\pi \quad \varphi(\vartheta_k) = \arg(r_f) \quad (3.14)$$

ahol az első tag a reflexiók tényező, a második pedig a waveguide által okozott fázistolás. Az egyenlet fizikai jelentése az, hogy a hullámnak egészszámszor kell „beleférdnie” a húrba (és az impedanciába) ahhoz, hogy állóhullám alakuljon ki. Az impedancia ismerete nélkül ez az egyenlet sajnos nem adható meg explicit formában. Ha az implicit egyenlet megoldása túlságosan bonyolultnak ígérkezik, vagy az impedancia értékeit csak diszkrét pontokban ismerjük és a fázismenetünk kellően lapos, további közelítéssel kell élnünk. Az első tag argumentumába az ideális waveguide adott frekvenciáját helyettesítve:

$$\vartheta_k = \frac{2k\pi + \varphi\left(\frac{2k\pi}{N}\right)}{N} \quad (3.15)$$

Tovább pontosíthatjuk az eredményt, ha most a kapott frekvenciát helyettesítjük be a fáziskarakterisztikába. Az iteráció stabilitására elégséges feltétel (a fixponttétel alkalmazásával):

$$\left| \frac{d\varphi(\vartheta)}{d\vartheta} \right| < N \quad (3.16)$$

minden ϑ -ra, szükséges feltétel pedig a megoldás kis környezetében található frekvenciákra. A gyakorlatban előforduló fázisfüggvények szerencsére teljesítik az elégséges feltételt, tehát az algoritmus tetszőleges kis hibával mindig megtalálja a megoldást.

Általános lezáró impedancia esetén r_v -t tehát a waveguide-ban egy lineáris szűrővel kell figyelembe vennünk, amely fázismenetéből közelítőleg meghatározhatjuk a kialakuló frekvenciákat (3.14, 3.15), amplitúdómenetéből pedig a lecsengési időket (3.12). Az ekvivalens rezonátoros struktúra a kapott értékekből és (3.13) segítségével felépíthető.

A kialakuló frekvenciákra az amplitúdómenet is hatással van, a gyakorlatban azonban a lezáró impedancia nagyságrendekkel nagyobb a hullámimpedanciánál, így r_v mindig -1 közelében marad, azaz számunkra medfelelően viselkedik. Ha rendelkezésre állnak numerikus módszerek, elvileg ennél pontosabb eredmény is elérhető (pl. teljes átviteli függvény részlettörtekre bontása a MATLAB *residue* utasítás segítségével). Az előző módszer azonban a későbbiekben modellillesztésre sokkal praktikusabban használható.

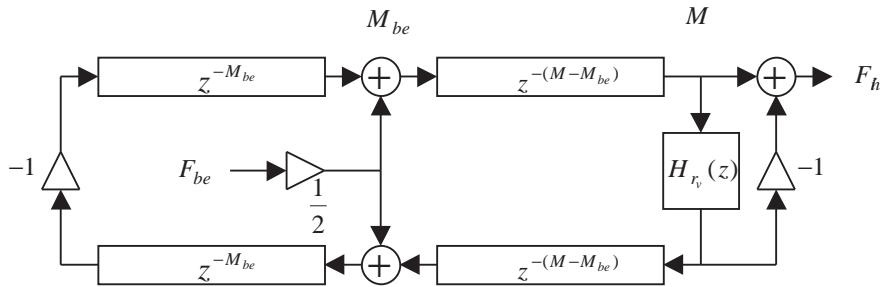
Most, hogy ismerjük a lezárások hatását, rátérhetünk a nemideális húr tárgyalására. Általános esetben a húr hullámegyenlete 3.1-hez hasonló alakot vesz föl, csak magasabb rendű hely- és időszerinti deriváltakkal egészül ki. A páratlanadik hatványú időszerinti deriváltak a húr *veszteségeiért*, a páros számú, helyszerintiek

pedig a diszperzióért felelnek pl. [Smith93]. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a nem ideálisan rugalmas (részben merev) húron a hullám terjedési sebessége a frekvencia függvényében változik, azaz a kialakuló frekvenciák eltérnek a harmonikus sortól.

Mivel a húr lineáris rendszer és mi két pont között figyeljük a viselkedését, az elosztott paraméterű veszteségek és a diszperzió egy pontba koncentrálható [Smith92]. A lezáró impedancia hatása egyszerűen figyelembe vehető, úgy érdemes tehát tekintenünk a húr rezgését, mintha minden ideálistól eltérő viselkedésért a lezáró impedancia lenne felelős. Tovább egyszerűsíthetjük modellünket, ha a két lezáró impedancia hatását az egyik oldalra transzformáljuk ($r_v = -r_{vbal} \cdot r_{vjobb}$), és a másik oldalon csak egy -1 -szeres szorzást alkalmazunk. Ez az új reflexiós tényező tehát egyrészt tartalmazza a tényleges lezáró impedanciák hatását, másrészt pedig a húr veszteséges és diszperz viselkedését. A továbbiakban az a feladatunk, hogy szimuláció vagy mérési eredmények alapján ezt a képzeletbeli impedanciát meghatározzuk. Ha ez sikerül, a modellünk a bemeneti és a kimeneti pontok között úgy fog viselkedni, mint az eredeti rendszer.

Tervezési szempontból előnyösebb a veszteségeket és a diszperziót szétválasztani. Az előbbit egy kellően kis fázistolású, az utóbbit pedig egy mindentáteresztő szűrővel modellezhetjük [Smith92].

Az eddigiekben feltételeztük, hogy waveguide-unk teljes hossza $2N$, ami a megvalósítható alaphfrekvenciákat erősen korlátozza. Ezt kiküszöbölendő megtehetjük, hogy egy *törtrészkésleltetőt* helyezünk a húr végére (ezt is beépítjük a képzeletbeli impedanciánkba), amellyel tetszőleges finomsággal beállítható a hangmagasság [Välimäki96], [Laakso96] (3.5. ábra).



3.5. ábra. A nemideális húr waveguide modellje

Modellünk paramétereit többféleképpen is meghatározhatjuk. Az irodalomban (pl. [Van Duyne 95], [Välimäki96]) a leggyakrabban használt módszer a lecsengő húr hangjának vizsgálata, ahol a waveguide végére illesztett reflexiós szűrőt a harmonikusok frekvenciáiból és lecsengési időiből határozzák meg. A módszer előnye, hogy kivitelezése egyszerű és a megfelelő szűrő illesztésével automatikusan jó eredményt ad, függetlenül attól, hogy a tényleges veszteségek a húr-lezárás rendszer mely részén keletkeztek. Alternatív módszer lehet a lezáró impedancia vizsgálata, itt viszont a húr veszteségeit és diszperz viselkedését valamilyen más (pl. analitikus) úton kell meghatározni, és a képzeletbeli, waveguide-ot lezáró impedanciát az eredeti impedancia és a veszteségek figyelembevételével kell megalkotni. Az első vizsgálati mód-

szer eredményeként tulajdonképpen a rezonátoros struktúra ismeretlen paramétereit (pólusok frekvenciája és középponttól való távolsága) kapjuk.

3.5. A waveguide új interpretációja

Megfordítva eddigi gondolatmenetünket és szakítva a fizikai képpel, a waveguide-ot úgy is tekinthetjük, mintha a rezonátoros struktúra approximációja lenne. Ha az egyes részlettörteket közös nevezőre hozzuk, megkapjuk a rezonátoros modellünk pontos mását. Általános esetben a tiszta késleltetővonal eltűnik és az egész waveguide a képzeletbeli lezáró impedanciából áll. Ezzel még nem nyerünk semmit, hiszen a szimuláció során elvégzendő műveletek száma nem csökken, ha viszont nem követelmény az, hogy a waveguide teljesen azonos módon viselkedjen mint rezonátorunk, nagyságrendnyi számítási előnyhöz juthatunk. Ahelyett, hogy pl. 100 rezonátor kimenőjelének összegeként állítjuk elő az adott hangot, azt közelítőleg egy késleltetővonalal és a végére illesztett 5-öd, 10-edfokú szűrővel megtehetjük. Az egyes harmonikusok frekvenciája és lecsengési ideje némileg el fog térni az eredetitől, de ez jelentősebb áldozatokat nem követel. Kimondottan jó hangú gitármodell készíthető elsőfokú reflexiós szűrő alkalmazásával [Välimäki96]. Míg a rezonátoros struktúránál a számításigény a szimulált harmonikusok számával arányos, addig a waveguide modellben ez az approximáció pontosságának függvénye. Úgy tűnik, hogy az emberi fül sokkal kevésbé érzékeny az esetleges pontatlanságokra mint a harmonikusok hiányára, adott számítási kapacitás mellett tehát a waveguide modellel rendszerint jobb hangminőséget érhetünk el. A rezonátoros struktúrát sem érdemes teljesen elvetnünk, a későbbiekben, bizonyos esetekben (pl. ha csak pár harmonikust kívánunk modellezni) jó szolgálatot tehet.

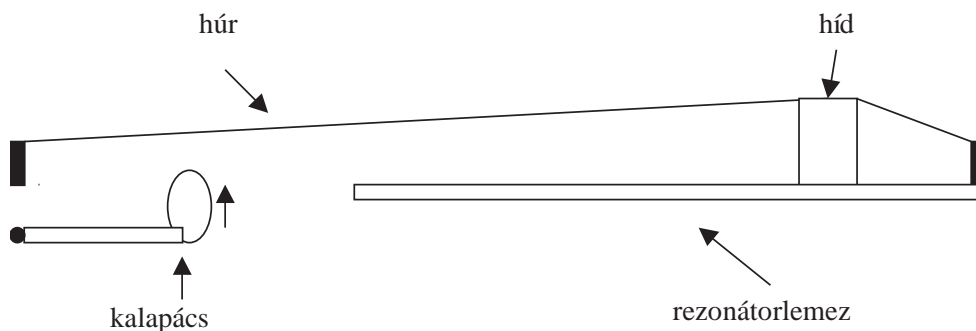
4. fejezet

A zongora

A zongora kialakulásának, történetének, működésének leírása az irodalomban részletesen megtalálható (pl. [Tarnóczy82], [Fletcher98], [Conklin96a], [Conklin96b], [Conklin96c], [Askenfelt90] [Askenfelt91], [Askenfelt93]), itt egy rövid összefoglaló után elsősorban a zongora hangzásáért felelős tényezőkkel foglalkozunk.

A zongora az ütött húrú hangszerek családjába tartozik, elődjének a klavikord tekinthető, amelyet a zongoristák egyszerűsége és olcsósága miatt még sokáig gyakorlóhangszernek használtak. Az első zongorát *Bartolomeo Cristofori* készítette 1709-ben, de a hangszernek még sok változáson kellett átesnie ahhoz, hogy a mai formáját elnyerhesse. Ez *Henry Steinway* munkásságának köszönhetően a XIX. század közepére történt meg. A mai és egy 1720-as, Cristofori által készített zongora összehasonlítása megtalálható az egyébként is talán legátfogóbb irodalomban [Conklin96a], [Conklin96b], [Conklin96c].

A zongora általános felépítése a következő (4.1. ábra): a hangszertest felső részébe egy acélkeret (a *páncélszerkezet*) van beépítve, amelyen a billentyűzetre közel merőlegesen kerülnek a hurok felfeszítésre. A hurok billentyűzethez közelebbi vége a hangolótömbhöz (*tőke*) kapcsolódik, a másik vége közvetlenül az acélkerethez, de előtte még át van vetve a hídon. A híd tulajdonképpen egy vékony lécs, amelyen keresztül a húr rezgése a páncélszerkezet alatt található *rezonátorlemezre* jut.



4.1. ábra. A zongora működésének sematikus rajza

A zongorát a fentebb leírtaknak megfelelően funkcionális blokkokra oszthatjuk. Első ilyen blokk a *gerjesztés*, azaz a kalapácsütés. Az emberi beavatkozásért felelős mechanikát is ideérthetjük, hiszen a művész csak a gerjesztés paramétereit tudja változtatni (a hegedűvel ellentétben pl. a húr hosszát nem). A mechanika a művész által bevitt *mozgási energiát* a kalapács mozgási energiájává alakítja, amely a húrral ütközve *rezgési energiává* alakul. A húr (azaz a *rezonátor*) felelős a rezgési energia tárolásáért, amelynek egy része a veszteségek következtében eldisszipálódik, a másik része pedig a hídon keresztül a rezonátorlemezre (a *sugárzóra*) jut. A rezonátorlemez ezt az átadott rezgési energiát *akusztikai energiává*, hallható hanggá alakítja.

4.1. A mechanika és a kalapácsok

4.1.1. A mechanika

A zongora mechanikája maga is egy finommechanikai műalkotás, működése rendkívül bonyolult. Ez a bonyolultság a minél gyorsabb hangisméltés elérésére irányul. A mechanizmus lényege, hogy a hangisméltéshez nem kell megvárni a kalapács nyugalmi helyzetbe való visszatérését (részben ez különbözteti meg a ma kizárólagosan használt *angolmechanikát* a régebbi *bécsimechanikától*). Első közelítésben a mechanika egy emelőszerkezetnek tekinthető, kb. 1 : 5-ös áttétellel a billentyű és a kalapács között. Fontos sajátossága, hogy a húr-kalapács kontaktus pillanatában már nincs semmiféle kapcsolat a mechanika és a kalapács között. Ha a billentyűt lassan lenyomjuk, a kalapács 4 – 6mm-rel a húr alatt megáll, normális játéknál az átadott mozgási energia repíti a kalapácsot a húr felé. A billentyű működtetésével a húr felett elhelyezkedő *hangtompítót* is megemeljük, amelynek célja, hogy a billentyű felengedésekor a húrra visszaesve azt elnémítsa.

A mechanika időzítésének vizsgálatokor *Askenfelt* és *Jansson* érdekes megfigyeléseket tett [Askenfelt90]. Megállapították, hogy a mechanika késleltetése rendkívül nagy mértékben függ a dinamikától. *Piano legato* játékmód esetén ez a késés akár 100 ms is lehet, míg a másik véglet, a *forte staccato* játékmód esetében a billentyű érintésétől a megszólalásig csak 25 ms telik el. Mivel ez az emberi fül számára már bőven észrevehető, a zongoristának kell játék közben a saját időzítését korrigálnia. A zongoristának a billentyű alsó helyzetbe érése jelenthet mechanikai visszacsatolást, itt az eltérés már jóval kisebb, 15 ms nagyságrendű, mindazonáltal a gyakorlott művészek ennél jóval pontosabb időzítést produkálnak. A kalapács sebessége méréseik szerint a húrnak ütődés pillanatában *piano* játékmód esetében $0.5-1$ m/s, *forte* játékmód esetében $4-5$ m/s körül van. A zongorista által a billentyűre kifejtett erő az előbbi esetben csak pár Newton, de *forte* játékmód esetén akár az 50 N-t is elérheti.

Ugyanezen cikksorozat második részében [Askenfelt 1991] a mechanika dinamikai tulajdonságait vizsgálták. Egészen eddig (lásd pl. [Tarnóczy82]) a zongora kutatásával foglalkozó szakemberek meg voltak győződve arról, hogy a művész csak a kalapács végsebességével képes befolyásolni a hangszínt, a billentés módjával nem, ezzel viszont a művészek többsége soha nem tudott egyetérteni. *Askenfelt* és *Jansson* eredményei kérdésessé teszik az irodalom eddigi álláspontját. A kalapács mozgásá-

nak elemzésekor kimutatták, hogy más és más játékmód, de ugyanazon végsebesség esetében a kalapács más és más rezgéseket végez. A kalapács rezgésének vizsgálatakor három alapvető módust találtak, 50 , 250 és 650 Hz körül 15 - 30 körüli jósági tényezővel. *Legato* játékmód esetén, amikor a mechanika folyamatosan gyorsítja a kalapácsot, ezen rezgések amplitúdója kicsi, ellentétben a *staccato* játékmód által keltett rezgésekkel. Az így esetlegesen kialakuló különbséget a húr rezgésében nem sikerült szignifikánsan kimutatniuk, ez még további kutatást igényel. Az viszont, hogy ugyanaz a végsebesség többféle billentéssel elérhető, a gyakorlott zongoristának egy újabb fegyvert ad a kezébe: a különböző billentésmódok ügyes használatával megoldható a dallam kihangsúlyozása, amelyet nem nagyobb hangerő alkalmazásával, hanem az akkord többi hangjához képesti egy kissé előbbrehozott megszólalással érnek el. Ennek alapja, hogy a különböző billentéssel előállított azonos végsebességekhez más-más késleltetési idő tartozik [Fletcher98].

Akár beigazolódik *Askenfelt* és *Jansson* gyanúja, akár nem, így is el lehet képzelni, hogy a zongoristának mennyi mindenre kell odafigyelnie, a művészi képességeken kívül ismernie kell a zongora mechanikájának viselkedését, és annak késleltetési és dinamikai tulajdonságait, és azokat a maga javára kell fordítania. Ezért van az, hogy bármilyen egyszerű darabot hallgatva rögtön kiderül, az adott játékos kezdő vagy képzett zongorista.

4.1.2. A kalapács

A zongora hangjának kialakulásában rendkívül fontos a kalapács szerepe. A kalapácsok keményfa magját filccel borítják. Ezen filc tulajdonságai nagyban befolyásolják a megszólaló hangot. Keményebb filc több magas harmonikust, élesebb hangot eredményez, puhább filc pedig lágyabbat. A zongora hangját nagyban lehet befolyásolni a kalapács keménységének változtatásával. A kalapács lágyítását túvel való szurkálással érik el, a keményítéshez pedig kémiai hatóanyagot használnak. A zongora elkészítésének utolsó lépése, hogy a kalapácsot, és így a hangzást a megrendelő igényeinek megfelelőre „hangolják”. A filc keménysége azonban nem homogén: ahogy a kalapács külső részéből a belső felé haladunk, a keménység nagymértékben növekszik. Ez a legfőbb oka annak, hogy nagyobb dinamikai szinten, azaz nagyobb becsapódási sebességeknél a hang felharmonikustartalma sokkal nagyobb [Conklin96a], [Askenfelt93]. A kalapács- filc tehát egy nemlineáris rugónak tekinthető, mely az összenyomás következtében egyre keményedik. Az irodalomban szinte mindenki által használt képlet a kalapácsra ható erőre:

$$F = K(\Delta x)^p \quad (4.1)$$

Ez így, első ránézésre túl egyszerűnek tűnhet a kalapács bonyolult viselkedésének leírására, de a gyakorlat azt mutatja, hogy lehet olyan K és p értékeket találni, amelyek az adott kalapács által kifejtett erőt tetszőleges kezdősebességek mellett jól leírják. Ezek az értékek (K és p) a mért adatokból görbeillesztéssel meghatározhatók, lásd pl. [Chaigne94a],[Chaigne94b].

A kalapácsütés folyamata tehát a következőképpen zajlik: a mechanika által felgyorsított kalapács a húrnak csapódik, de mivel tömege a húrhoz képest nem elhanyagolható, nem pattan rögtön vissza, hanem a húrral egy ideig (*pár* ms) kapcsolatban marad. A húr közelebbi végéről, azaz a hangolótüskék felől visszaverődő hullámok lökik el a kalapácsot a húrtól, de ehhez a legtöbb esetben az első hullám nem elegendő. A kalapácsra (és így a húrra) ható erő tehát lökeshullámok sorozata, ez adja a grafikonon „tarajos” jellegét. A görbe alakjáért, simaságáért (és így a harmonikustartalomért) mind p , K és a kezdeti sebesség is felelős, a kontaktus időbeli átlagos hosszát pedig adott húr és adott p esetén a kalapács és a húr tömegének aránya határozza meg (ezen belül a kontaktus időtartama az ütközési sebességgel fordítottan arányos). Minél nagyobb a kalapács tömege a húrhoz képest, annál hosszabb ideig marad a kalapács a húrral kapcsolatban.

A kalapács akkor gerjeszti leghatékonyabban a húrt, ha azt pont félperiódusnyi ideig teszi. Ez a középső hangoknál teljesül is, a magas hangoknál azonban a kontaktus ideje jóval hosszabb, a mély hangoknál pedig jóval rövidebb az ideálisnál [Fletcher98]. Ennek a hatásnak a csökkentése céljából alkalmaznak a mély hangok irányában egyre növekvő tömegű kalapácsot.

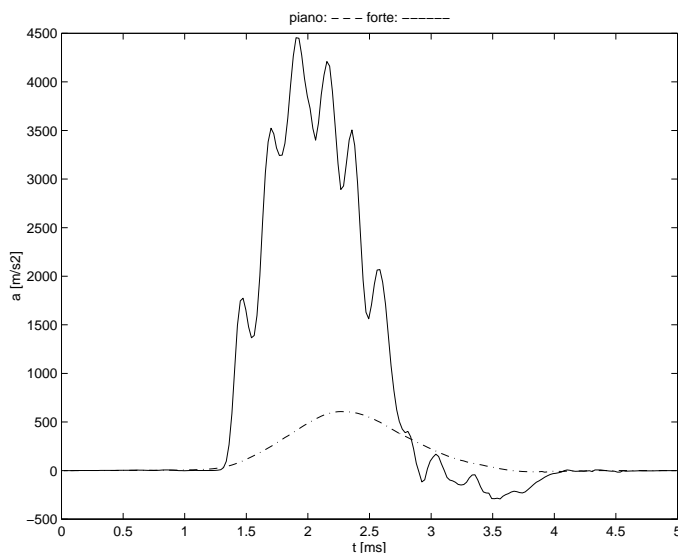
A kialakuló hang spektruma nagyban függ attól is, hogy a kalapács hol üti meg az adott húrt. A waveguide elemzésénél tárgyalt okok miatt ez egy fésűszűrő hatást eredményez, azaz bizonyos harmonikusok amplitúdója nagyon kicsi lesz (az elméleti modellel ellentétben azonban teljesen nem tűnnek el, mert más módusoktól nemlineáris csatolás következtében energiát nyernek).

A (4.1) szerint felépített kalapácsmodell és a waveguide (részleteket lásd a zongora szimulációjáról szóló fejezetben) segítségével lehetőség nyílt az irodalom eredményeinek ellenőrzésére. A szimuláció eredményei jó összhangban álltak a fent leírtakkal, a spektrum felharmonikusokban gazdagodott, ha K vagy a kalapács sebessége nőtt, de a kontaktus hossza időben gyakorlatilag nem változott jelentősen (lásd az 5.3. ábrát). A kitevő (p) változtatása mind a harmonikustartalomra, mind a kontaktusidőre hatással volt. Növekvő p növekvő időtartamokat és így felharmonikusokban szegényebb spektrumot eredményezett, de így az erő maximuma is változott. Helyesebb lenne p változtatásakor K -t is megfelelően korrigálni, ráadásul az időtartamok egymáshoz képesti viszonya különböző kalapácssebességeknél más és más volt, tehát ebből egyelőre semminemű következtetést nem tudunk levonni. (A növekvő p -vel a modellezés során elnyúló impulzusok magyarázata a következő: mivel a kalapács összenyomódása 1-nél jóval kisebb, növekvő kitevőhöz kisebb átlagos erő tartozik, így az csak később tudja ellökni a kalapácsot a hídtól. Ezért lenne szükség K korrigálására, hogy ezt a hatást kiküszöböljük.) A kontaktus hossza a kalapács tömeg és a húr impedancia arányának is függvénye, mindkettő azonos arányú növelésekor a fellépő erő alakja szinte teljesen azonos maradt, csak nagysága változott. (Itt fontos megjegyezni, hogy a húr tömegének bizonyos arányú növelése megegyezik az impedancia ugyanazon arányú növelésével, hiszen az azonos alaphang frekvencia megtartásához a feszítőerőt (T) is azonos arányban növelni kell, lásd (3.1) ill. (3.4)). A waveguide és a rezonátoros struktúra alapelvéből következően a megütközési pozíció változtatásának hatását nem volt nehéz kimutatni, természetesen a várt

eredményt kaptuk.

4.1.3. A kalapács viselkedésének vizsgálata

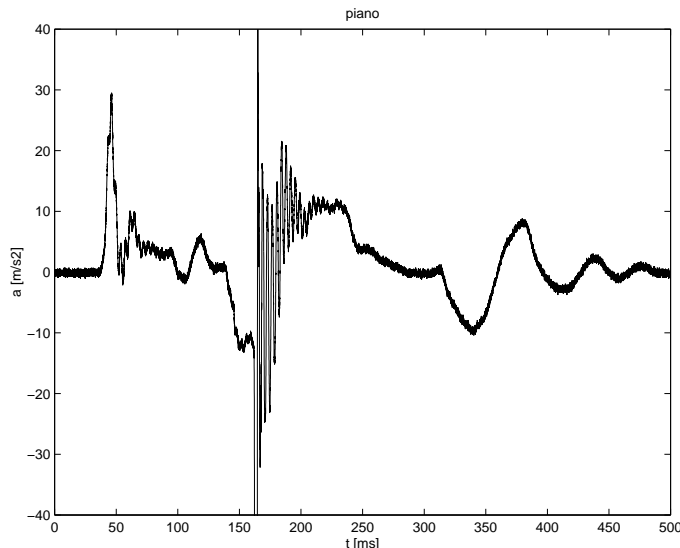
A zongora mérésekor a kalapács viselkedését is vizsgáltuk. Miniatűr gyorsulásérzékelőt szerelve a kalapácsra annak gyorsulásából ugyanis következtethetünk a kalapácsra (és a húrra) ható erőre, mivel az jó közelítéssel a gyorsulással arányos. Az erő abszolútértékét csak a kalapács tehetetlenségi nyomatékának ismeretében lehetne megmondani, de a jelenségek vizsgálatára nekünk a jel alakja is teljesen megfelelő. Több (összesen 10) hangnál végeztünk méréseket a zongora skáláján egyenletesen elosztva, több dinamikai szinten piano és staccato játékmódban. A mérési eredmények jellegben jól összecsengnek az irodalom adataival, az általunk 20 és 300 Hz környékén talált kalapácsrezonanciák a gyorsulásérzékelő okozta plusz tömeg (a kalapács tömege kb. $8\text{-}9\text{g}$, a gyorsulásérzékelőé 1.95 gramm) megléte miatt fenntartásokkal kezelendők, a gyakorlatban valószínűleg magasabb frekvenciákon vannak. Érdekes, hogy a 20 Hz-es módust nem sikerült mindig kimutatni, a 300 Hz körüli rezonancia viszont minden kalapácsnál és dinamikai szinten megfigyelhető volt. A mért kontaktusidők elég hasonlóak az irodalom adataihoz. Illusztrációképpen a 4.2. ábrán mutatjuk be a kalapács gyorsulását piano és forte játékmódnál a kontaktus pillanatában (a vizsgált húr: A_4^4 , 467 Hz): A diagram a jobb áttekinthetőség kedvéért a gyorsulás -1 -szeresét ábrázolja (hiszen a kalapács az ütközés folyamata alatt lefele gyorsul).



4.2. ábra. A kalapács gyorsulása az ütközés pillanatában

Jól látható, hogy nagyobb kezdeti sebesség esetén nemcsak az erőimpulzus amplitúdója, hanem a hossza és az alakja is megváltozik. A piano játékmód ábráját függőlegesen kinagyítva a kontaktus gyorsulásviszonyai ugyan nem látszanak (azok

sokkal nagyobbak), de látható a kalapács ütközés előtti és utáni gyorsulása. Ezt a jelenséget szemlélteti a 4.3. ábra (itt a pozitív értékek már felfelé irányú gyorsulásának felelnek meg).



4.3. ábra. A billentés teljes folyamata

A kalapács az irodalomnak megfelelően viselkedik, azaz az ütközésig nem egyenletesen gyorsul, hanem rezgőmozgást végez. Az ütközés után a rezgőmozgás megmarad, ez a billentyűzet keretén keresztül a rezonátorlemezre jutva részben oka lehet a zongora hangjára oly jellemző „koppanásnak”. Az ábrából a mechanika késleltetése is megfigyelhető, több, mint 100 ms-nak kell eltelnie a kalapács gyorsulásának megkezdésétől a hang megszólalásáig. Forte játékmód esetén ez az idő az irodalom eredményeinek megfelelően 20-30 ms-ra rövidül.

4.2. A zongora húrjai

A zongora húrjai acélból készülnek. A nagy hatásfok (azaz a kicsi veszteség) igénye nagy feszítőerőt kíván (ez átlagosan 700 N minden egyes húrra), a hurok így a szakítószilárdságuk 30-60 %-a körül vannak megfeszítve. A nagyobb hangerő elérése érdekében (az alsó két oktávtól eltekintve) hangonként három húr alkalmaznak. Ezek a hurok a gyakorlatban egymáshoz képest 1-2 centtel mindig el vannak hangolva, a pontosan azonos frekvenciára hangolt hurok a cimbalomhoz hasonló hangszínt eredményeznek (1 cent a zenei félhang századrészét jelenti, a frekvenciaarányból így számolható: $cent = 1200 * \log_2(f_2/f_1)$). A hurok hossza nem pontosan fordítva arányos a hangmagassággal. Ennek egyik oka, hogy a nagyon rövid felső hangoknak nem volna kellő hangerejük, a másik pedig, hogy nagyon hosszú mély hurokhoz sokkal nagyobb zongoraszekrényre lenne szükség. Ezt a problémát a hurok tömegének növelésével oldják meg. A vastagabb húr viszont nagyobb diszperziót

eredményez, mivel a húr akkor már a merev rudakhoz hasonlóan viselkedik, így a módusai eltérnek a harmonikus sortól, hangzása inharmonikus lesz. Erre is van megoldás, a vékonyabb acél magot vörösréz szállal körbetekerve a húr tömege a merevség számottevő növekedése nélkül megnövelhető. A legmélyebb húroknál a kellő hatás eléréséhez kétszeres tekeréssel alkalmaznak [Tarnóczy82].

4.2.1. Több húr rezgése, kétirányú transzverzális polarizáció

A zongora hangjának jellegében a húroknak van a legjelentősebb szerepük, az egyes, a konstrukcióból adódó tényezők hatását érdemes tehát sorra venni. Az, hogy egy hanghoz több húr tartozik, nem csak az energiakicsatolás hatásfokát növeli, hanem a zongora karakterének meghatározásában is nagy szerepe van. Ha feltételezzük, hogy ezen hurok rezgése független egymástól, de a hurok egy kicsit el vannak hangolva, akkor a kapott hang amplitúdója a különbségi frekvenciának megfelelően modulált lesz, azaz „lebegés” fog létrejönni. Ennél árnyaltabb a kép, ha a két vagy három húr egy közös impedancián keresztül csatolódik egymáshoz, ilyenkor az eddig különálló módusfrekvenciák alapján új módusok jönnek létre. Nagyon szemléletes tárgyalás található két húr esetére Weinreich a későbbi irodalom által is oly gyakran idézett 1977-es cikkében [Weinreich77]. Mind a levezetések, mind az akkori szimulációs eredmények azt mutatják, hogy bizonyos feltételek mellett (pl. a hurok elhangolására és a csatolásra) a két húr csatolt rezgése is adhat magyarázatot a zongora hangjára oly jellemző kétütemű lecsengésre (ez azt jelenti, hogy a hang burkolója először meredekebben, majd lankásabban csökken, logaritmikus skálán ábrázolva a töréspont jól látható). Ennek ellenére a dolgozat szerzőinek a később ismertetésre kerülő zongoramodell működtetésével (az egyébként megfelelő hangot produkáló csatolással és hurok közötti széthangolással) nem sikerült a jelenséget kimutatni. Úgy tűnik, a zongora adott paraméterei mellett a széthangolt hurok sokkal inkább a lebegésért, mint a kétütemű lecsengésért felelősek.

Ez utóbbi jelenségre Weinreich ugyanazon cikkében egy másik magyarázatot ad: ez pedig a hurok kétirányú transzverzális polarizációja. Mivel a húr rezgése sokkal jobban csatolódik a rezonátorlemezre merőlegesen a rezonátorlemezhez, mint arra párhuzamosan (hiszen a rezonátorlemez leginkább a síkjára merőlegesen rezeg), a lecsengési idők a síkra merőleges és azzal párhuzamos transzverzális polarizációkra különbözőek lesznek. A kalapácsütés legfőképpen a síkra merőleges polarizációt gerjeszti, ennek kezdeti amplitúdója tehát jóval nagyobb lesz, lecsengési ideje viszont jóval kisebb (a jobb csatolás miatt), mint a rezonátorlemez síkjával párhuzamos polarizációnak. A hang megszólalásakor először tehát a meredekebb, később pedig a lankásabb lecsengés fog dominálni.

4.2.2. Inharmonicitás

Érdemes visszatérni a fentebb már említett inharmonicitás tárgyalására. A húr merevsége következtében a rudakhoz hasonlóan fog viselkedni, azaz a merev húr hullámegyenlete az ideális húr és az ideális rúd (a hajlítóhullámokra vonatkozó) hullámegyenletének a kombinációja. A húr egyenlete a következő alakot veszi fel:

$$\frac{\mu \partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - ESK^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (4.2)$$

Ahol E a Young modulus, S a felület, K pedig a girációs sugár, ami henger esetében a tényleges sugár fele. Ezt megoldva kis merevségek esetén a következő képletet kapjuk a létrejövő módusfrekvenciákra (az irodalomban a különböző elhanyagolások miatt különböző képleteket találunk, itt *Fletcher* 1962-es képletét használva [Conklin99]):

$$f_n = n f_0 \sqrt{1 + B^2} \quad B = \frac{\pi^3 E d^4}{64 l^2 T} \quad (4.3)$$

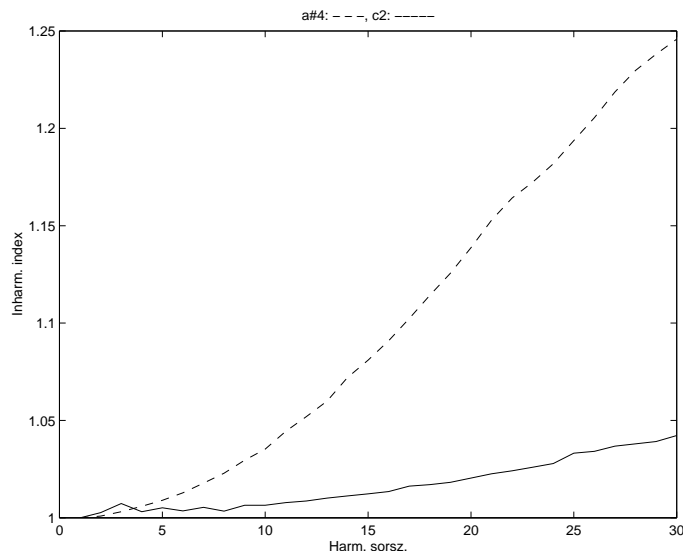
Ahol f_0 az ideális húr eredeti alapharmonikusa, n a harmonikus sorszám, d a húr átmérője, l a húr hossza. B (azaz az *inharmonicitási tényező*) csak homogén húrok esetén számítható a fenti képlettel, a rézzel körbecsavart húrokra ez némileg bonyolultabb (lásd pl. [Fletcher98]), mindenesetre kisebb értéket vesz fel a hasonló hangmagassággal rendelkező tömör húrhoz képest. A képletekből jól látható, hogy a harmonikus sorszámának növekedésével a diszperzió is növekszik. Az inharmonicitás észleléséhez nagyobb frekvenciákon nagyobb B szükséges, azaz magasabb hangoknál fülünk kevésbé érzékeny az inharmonicitásra [Järveläinen99]. Bár a zongora húrjainak inharmonicitása az alapharmonikus növekedésével növekszik, szubjektív megfigyelések alapján az alsó hangok sokkal inharmonikusabbnak tűnnek. Ennek egyik oka a hallásunk fent említett tulajdonsága, másik pedig az, hogy a mélyebb hangoknál sokkal több harmonikus van jelen, és bár B kisebb, a még hallható harmonikus n sorszámuk sokkal nagyobb a magas hangokhoz képest.

Kérdés, hogy szükségünk van-e az inharmonicitásra. *Conklin* megállapítja, hogy ha a zongoristáknak választania kell a hangszerek között rendszerint a legnagyobb méretűt választják, és minél nagyobb a zongora, annál hosszabbak a húrok és így annál kisebb az inharmonicitás. Kisebb hangszerek (pl. pianinok) mélyebb húrjai rendszerint sokkal inharmonikusabban szólnak. Az inharmonicitás következtében, ahogy a harmonikusok széjjelbb húzódnak, a különbségi frekvencia is növekszik. A legmélyebb hangoknál, ahol az alapharmonikus amplitúdója kisebb az azt követő harmonikusokénál, a hangmagasság szubjektív meghatározása alapvetően a felsőbb harmonikusok alapján történik, így a hang veszít definiáltságából (fülünk nem tudja eldönteni, hogy a gyenge alapharmonikusnak vagy a frekvenciakülönbségnek higgyen). Az inharmonicitás jellemző a zongora hangjára, és a konstrukcióból következően elkerülhetetlen, ezzel együtt *Conklin* szerint minél kisebb inharmonicitásra kell törekedni és az inharmonicitás mértékének hangról hangra folyamatosan kell változnia [Conklin96c].

4.2.3. Az inharmonicitás mérése

Méréseink és az irodalom adatai között most is egyezést találni, a frekvenciák jól követik az elvi képletet (4.3). Bár B elméleti kiszámítására nem volt lehetőségünk (nem tudtuk megmérni a húr mechanikai paramétereit), az adatokból B -t görbeillesztéssel visszaszámolva az eredeti és az elvi görbe jó egyezést mutatott. A 4.4. áb-

rán a C_2 (65 Hz) és az A_4^\sharp (467 Hz) *inharmonicitási indexei* (I_n) (azaz a tényleges frekvencia osztva az ideális húr ugyanazon módusának frekvenciájával) láthatók az első harminc harmonikusra.



4.4. ábra. Az A_4^\sharp és a C_2 hang inharmonicitási indexei

A visszaszámolt inharmonicitási tényezők (B -k) C_2 esetén 0.0001, A_4^\sharp esetén 0.00075. Látható, hogy a 30. harmonikus a magasabb alapfrekvenciájú húr esetén sokkal nagyobb elhangolódást mutat, de ott a lecsengési ideje és amplitudója is jóval kisebb, csak a megszólaláskor hallható (frekvenciája 17 kHz körül van). A mélyebb húrnál a 30. harmonikus elhangolódása ugyan kisebb mértékű, de lecsengési ideje nagyságrendekkel nagyobb, frekvenciája 2 kHz körüli, azaz még bőven van hely fölötte további harmonikusoknak, amik aztán egyre jobban elhangolódnak.

A zongora hangolása fontos következménye a zongora inharmonicitásának. Mivel a zongorahangolók a kvintek alapján hangolnak, és a kvint alsó hangjának harmadik harmonikusa jobban eltér a harmonikus sortól, mint a kvint felső hangjának második harmonikusa, az így előálló hangköz a valóságban nagyobb lesz egy kvintnél. Ennek a hatásnak az eredményeképpen a zongora legalsó hangjai 30 centtel alatta, legfelső hangjai pedig 30 centtel felette vannak a temperált értéknek. Érdekes, hogy szubjektív szempontból ezek a „jól hangolt” zongorák, a hanggenerátorral pontosan behangolt hangszerek nem szólnak kellemesen [Tarnóczy82].

Míg *Conklin* a zongoraépítő szemével vizsgálta a hagszer inharmonicitását, mi kíváncsak voltunk arra is, hogyan szólna a teljesen harmonikus zongora, amely az additív szintézis segítségével életre kelthető. Egy később ismertetésre kerülő program segítségével meghatároztuk a harmonikusok frekvenciáit, kezdeti amplitúdóját és lecsengési idejét. A hangokat a szintézis során a megadott frekvenciáknak megfelelő szinuszhangokból állítottuk össze, exponenciális burkolók figyelembevételével. Bár a modell sok paramétert nem vesz figyelembe, kipróbáláskor egyértelműen zongorahangot produkált. Ezek után eltüntettük modellünkben a diszperziót, azaz a

szinuszos komponensek frekvenciáit az első harmonikus frekvenciájának egész számú többszöröseire állítottuk. A magasabb hangoknál a hatás nem volt drámai, a megszólalás kicsit élesebb lett, de megmaradt a hang alapvető karaktere. Ugyanezt mélyebb hangokra kipróbálva viszont drasztikus hatást tapasztaltunk: a harmonikus zongora idegesítően „digitálisan” szólt, eltűnt az eddigi melegsége, a hangzás érdekessé vált. Meg kell említeni, hogy az eredeti frekvenciaértékekkel előállított hangok közül a mélyebbek eleve zongoraszerűbbnek tűntek. Kísérleteinkből azt a konzekvenciát lehet levonni, hogy bár a zongorát szebb hangúnak tartják, ha kisebb az inharmonicitása, a jelenség rendkívüli módon hozzájárul a zongora hangzásának felismeréséhez, tehát modellezése feltétlenül szükséges, különös tekintettel az alsó regiszterekre.

Ez a jelenség más (nem inharmonikus) hangszerek szintézisekor is alkalmazható, némi inharmonicitás hozzáadásával a hangot kellemesebbé és valóságosabbá tehetjük. A valóságos hangszerek hangját vizsgálva az egyes harmonikusok egymáshoz képesti fázisában állandó mozgást figyelhetünk meg. Ehhez hasonló hatást érhetünk el a harmonikusok frekvenciájának kismértékű elhangolásával, a számítási komplexitás jelentős növelése nélkül. Bár az így előálló fázishelyzet-változás nem lesz pontosan azonos a valóságos hangszerek hangjában tapasztalttal (hiszen az inharmonicitás az egyes harmonikusok egymáshoz képesti fázisát folyamatosan változtatja), ez is elég ahhoz, hogy elkerüljük az állandó egymáshoz képesti fázishelyzetből adódó természetellenes hangzást.

4.2.4. Nemlineáris hatások, longitudinális hullámok

A zongora húrjainak mozgását vizsgálva azok a módusok, amelyeknek a gerjesztésnél csomópontja van, nem hiányoznak teljesen (az elvi modellel ellentétben), csak amplitúdójuk kisebb a többi módusénál. Burkológörbájük is eltérést mutat, a többi módussal ellentétben amplitúdójuk először lassan (kb. 0.1 s-ig) növekszik, és csak ezután kezd csökkenni. Ebből nyilvánvalóan következik, hogy ezek a módusok valahogyan energiát nyernek a többi módustól, és ez csak nemlineáris csatolás következtében lehetséges. *Legge és Fletcher* elméleti és kísérleti úton is vizsgálta ezt a hatást [Legge84]. Az egyenletek mellőzésével áttekintjük kutatásuk eredményeit. A nemlineáris hatás kiindulópontja a húr feszültségének változása. Ahogy a húr alakja mozgása során változik, más és más lesz a húr hossza, és ez a megnyúlással arányos feszítőerő változást okoz. Általános esetben ez egy *ív hosszintegrállal* számítható. Az ideálisan lezárt, veszteséges (csak elsőrendű veszteségi tag) hűrt vizsgálva a következő közelítő eredményre jutottak: a húr lecsengésével a húr feszítőereje, így frekvenciája exponenciálisan csökken és emellett az erőben az adott frekvencia kétszeresének megfelelő szinuszos moduláció is megfigyelhető. Az így kialakuló transzverzális erőváltozás tökéletesen merev lezárások esetében csak ugyanazon módusra képes visszahatni. Ha azonban az egyik lezárás a húrra merőlegesen rezgést végezhet, akkor n és m módus képes energiát átadni $|2n \pm m|$ számú módusnak. Tovább közelítve a modellt a valósághoz, megvizsgálták azt is, mi történik, ha a hídon átvett húr a híd két oldalán szöveget zár be egymással. Ilyenkor a húr feszítőerejének változása a szög szinuszával arányos erővel hat a hídra. Az így kialakult

függőleges irányú mozgás pedig visszahat a húr rezgésére. Ezen az elven az adott módus a kétszeres frekvenciájú módust gerjeszti.

Conklin mérésekkel kimutatta, hogy ez a feszítőerő változás nemcsak a hiányzó módusok generálásáért felelős, hanem a hangszer hangjában is meglepően nagy amplitúdával megjelenik [Conklin99]. Az általa „fantom felhang”-oknak keresztelt rezgések amplitúdója gyakran csak 10 dB-lel marad alatta a legközelebbi „igazi” harmonikus amplitúdójának. Ezek egyrészt az eredeti harmonikusok kétszeres frekvenciáján jelentek meg, másrészt pedig az eredeti harmonikusok összegfrekvenciáján. Ezek közül is azok domináltak leginkább, amelyek egymás melletti eredeti harmonikusoktól származtak. A fantom felhangoknak azért van a zongoránál különös jelentősége, mert az eredeti felhangok erősen inharmonikusak, így a nemlineáris keverés következtében előálló frekvenciák nem esnek az eredeti módusok közelébe. A fantom harmonikusok, az inharmonicitással egyetemben, nagy hatással lehetnek a zongora hangjának megítélésében.

A húr feszültségének változása mint nemlineáris csatolás, nemcsak az egyes módusfrekvenciák között képes energiát átadni, hanem az egyes polarizációk között is. A húr két transzverzális polarizációja is ilyen módon csatolódik. A polarizációs ellipszis ennek következtében nem marad nyugalomban (ahogy azt független rezgésformák esetén várnánk), hanem precessziós mozgást végez [Fletcher98].

Giordano és *Korty* [Giordano96] szerint ez a nemlineáris erőváltozás az oka a *longitudinális hullámok* megjelenésének. Vizsgálatuk abból a megfigyelésből indul ki, miszerint a zongora hangját vizsgálva a tényleges zenei hang megjelenése előtt egy „előfutár” figyelhető meg. Ezért az előfutárért a feltételezések szerint a longitudinális hullámok felelősek, hiszen azok a transzverzális hullámoknál gyorsabban terjednek. Ez a hullám a kalapácsütés következtében fellépő megnyúlásváltozás következtében jön létre.

Ugyanezen cikk megpróbálja megmagyarázni a longitudinális hullámok által keltett rezgések rezonátorlemezre jutását is. A szerzők szerint ennek a longitudinális hullámterjedés következtében létrejövő keresztmetszetváltozás az oka, az, hogy a húr a rezgés során hol vastagodik, hol pedig vékonyodik.

Ezzel, bár bizonyítékaink nincsenek, nem tudunk teljes mértékben egyetérteni. Szerintünk az így létrejövő keresztmetszetváltozás kicsi ahhoz, hogy jelentős energiát legyen képes átadni, nem is beszélve arról, hogy a húrt a híd csak egy oldalról határolja, más irányokban szabadon kitágulhat. Sokkal logikusabb magyarázatnak tűnik a már idézett [Legge84] cikk érvelése, mely szerint, ha a húr a híd előtt és után szöveget zár be (és ez a zongoránál így is van), akkor a longitudinális erő változása következtében a hídra lefelé ható erő is változik. Ennek némileg ellentmond, hogy a hídon elhelyezett gyorsulásérzékelő (amely a rezonátorlemezre merőleges komponenszt mérte) jelében nem tudtuk mindig kimutatni az előfutár jelét. (Ez persze a mérés pontatlanságából is eredhet.)

Két feltételezésünk is van arra, hogy ez a longitudinális rezgés hogyan juthat ki a rezonátorlemezre. A húr feszítőerejének változása a hidat esetlegesen a húrral párhuzamos irányba mozgathatja, amely így torziós rezgéseket adhat át a rezonátorlemeznek. A másik feltételezés arra alapul, hogy a hídon átvett hullámok alakja

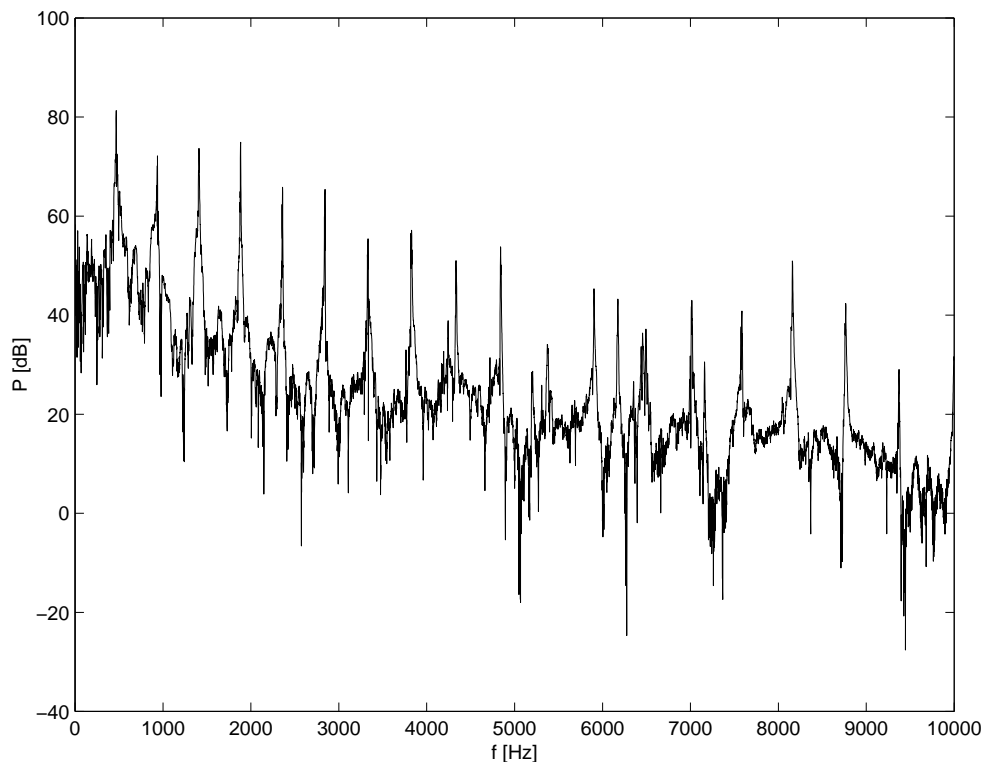
a hídon megtörik, ahogy a két tüskére fel vannak feszítve, az esetleges erőváltozás tehát a rezonátorlemez síkjára merőleges tengely körüli torziós erőkomponenst eredményezhet a hídon. Hogy ez milyen módon juthat ki a rezonátorra, kérdéses. Ezen feltételezések helyességének vizsgálata további méréseket igényel, mindenesetre a kettő közül az előbbi tűnik a valószínűbbnek.

A zongora hangminőségéért nagymértékben felelős az első transzverzális és longitudinális módus frekvenciájának aránya [Conklin96c]. Ezek között az eltérés tipikusan $4200\text{-}5200$ cent (azaz 42-52 félhang), és ez a húr hangolásától függetlenül mindig állandó. Ha ez az eltérés véletlenszerű, azaz nincs harmonikus viszony a két módus között, az a hangminőség romlásához vezet.

Különösen igaz ez a kisebb zongorák mély húrjaira, ahol a rossz alacsonyfrekvenciás kicsatolás miatt a longitudinális rezgés esetleg hangosabb lehet az eredeti alaphangnál, és ezzel a hangmagasság szubjektív meghatározását bizonytalaná teheti. Ez elkerülhető, ha a zongora húrjait úgy tervezik, hogy a két polarizáció első módusa harmonikus viszonyban (pl. 4 oktáv távolságra) legyen.

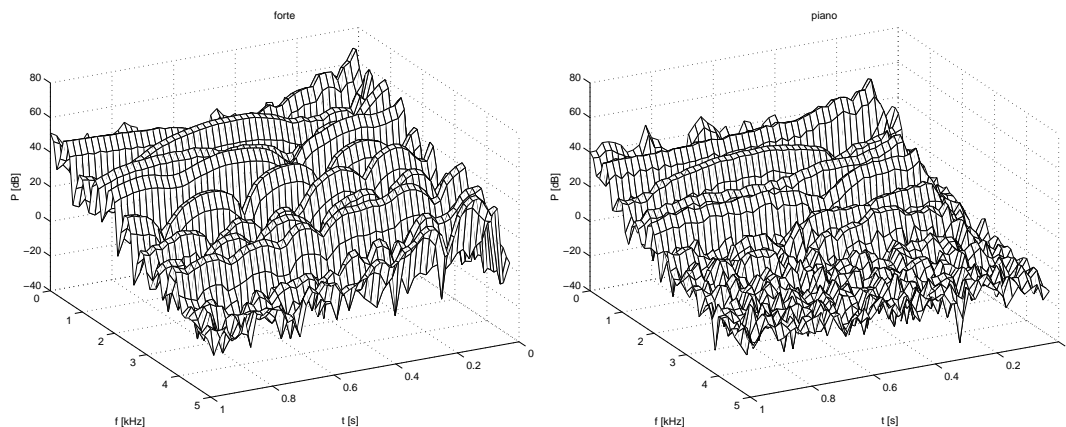
4.2.5. A zongorahang spektruma

A 4.5. ábrán az általunk mért zongora A_4^{\sharp} hangjának első 0.5 s-ának spektruma látható 10 kHz-ig, *forte* megütés esetén.



4.5. ábra. A zongora által keltett hangnyomás spektruma

Jól láthatóak a 9., 10. és 11. harmonikus alatti, nemlineáris keveréssel keletkezett fantom felhangok, a 12. és a 13. felhang közötti nagy csúcs pedig az első longitudinális módus. Ugyanezen hang első 1 s-ának STFT (Rövid Idejű Fourier-Transzformáció) diagrammja látható a 4.6. ábra bal oldalán 5 kHz-ig. A vizsgált jel ablakmérete a periódushossz négyszerese, ez elég jó kompromisszumnak tűnik az időbeli és a frekvenciabeli felbontás tekintetében.



4.6. ábra. A hang spektrumának időbeli alakulása, két különböző szinten

A harmonikusok burkológörbéi a várakozásoknak megfelelően ingadoznak, érdekes azonban megfigyelni, hogy ezt nem azonos mértékben teszik. A legfurcsábban talán a 8. és a 9. harmonikus viselkedik, a 8. egy lebegés után megáll, egy ütemet kihagy, a 9. pedig először alacsonyabb, majd magasabb frekvencián lebeg. A vizsgált időszak túl rövid ahhoz, hogy a kétütemű lecsengés látható legyen rajta, de hosszabb időszakot vizsgálva azt is megtaláltuk a méréseinkben.

Ugyanazon ábra jobb oldalán piano megütéskor felvett hang STFT diagrammja látható. Jól észrevehető, hogy nemcsak az amplitúdó változik, hanem az egyes harmonikusok aránya is. Míg *forte* játéknál ugyanazon hang 25. harmonikusa is megtalálható (bár az ábrán ez nem látszik) a spektrumban, *piano* esetében gyakorlatilag a 6. harmonikus felett már nem találunk jelet. Jellegzetesség tehát, hogy alacsonyabb kalapácssebességeknél a spektrum meredekebben esik. Az egyes harmonikusok burkológörbéi is eltéréseket mutatnak, bár akkor már rég nem állnak kapcsolatban a kalapáccsal, más és más mozgást végeznek. Lineáris húrmodellt feltételezve a gerjesztésnek csak a harmonikusok amplitúdójára kellene hatással lennie, lecsengésére nem. Itt ennek a jelenségnek a legfőbb oka valószínűleg az, hogy a kalapács az egyes húrokat nem ugyanolyan arányban gerjeszti, egyenetlensége miatt a húrok a különböző dinamikai szinteken más és más arányban vesznek át tőle energiát. Az átlagos lecsengési idők azért szerencsére az ütés erejétől függetlenül közel állandóak maradtak.

A megszólaló hang frekvenciája a megütés pillanatától ténylegesen csökkent, az eltérés azonban a már oly gyakran idézett A_4^{\sharp} hang esetében valamivel kisebb volt 0.2 Hz-nél, ami kb. 0.75 centnek felel meg (100 cent egy félhang), és más hangok vizs-

gálatakor sem találtunk ettől jelentősen eltérő eredményt. Ez a frekvenciaváltozás annyira kicsi, hogy megállapíthatjuk, a zongora hangzásában ennek nincs különösebb szerepe.

4.3. A híd és a rezonátorlemez

A zongora rezonátorlemeze leggyakrabban lucfenyőből készül. A fenyőt szálirányban lécekre szeletelik és ezeket a léceket összeragasztják. Mivel a fa merevsége szálirányban sokkal nagyobb, mint arra merőlegesen, a merőleges irányt merevítő lécek (bordák) becsapolásával erősítik meg. Így jelentősebb tömegnövekedés nélkül kellően nagy merevséget (és terjedési sebességet) tudnak elérni. Olcsóbb zongorák rezonátorlemezeit gyakran rétegelt lemezből készítik, a különböző anyagú és fajtájú zengőlemezek összehasonlítása megtalálható az irodalomban [Conklin96b].

A húrok rezgése a hídon keresztül jut el a rezonátorlemezhez. A híd impedanciaátalakítóként üzemel, a húr így nagyobb impedanciát lát annál, mintha közvetlenül a rezonátorlemezhez kapcsolódna. Utóbbi esetben túl gyors lenne a hangok lecsengése. A rezonátorlemez és a híd tervezésével tehát beállítható az egyes harmonikusok hangereje és lecsengési ideje, bár ezek egymással összefüggnek [Fletcher98].

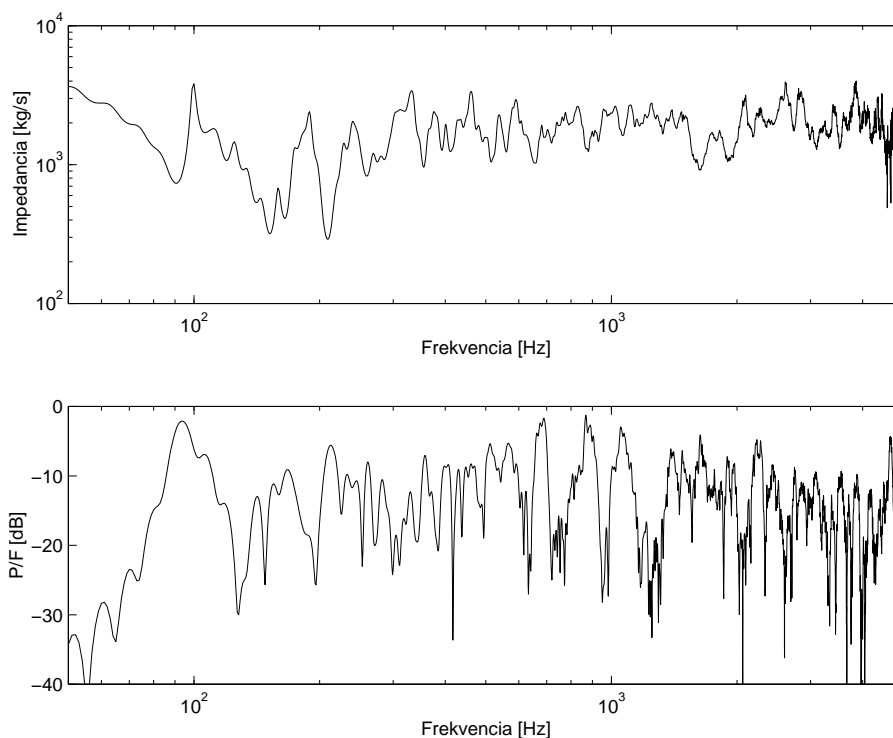
A rezonátorlemeznek (és a hídnak) kettős szerepe van a zongora hangzásának kialakításában: egyrészt a húr felé mutatott impedanciájával befolyásolja az egyes harmonikusok energiakicsatolását (lecsengését és hangerejét), másrészt pedig meghatározza a húrok által átadott energiából a levegőbe jutó energiát (a sugárzási és veszteségi tulajdonságai alapján).

A rezonátorlemez impedanciagörbéjét vizsgálva feltűnik a meglepően nagy módussűrűség, egy-két módustól eltekintve az egyes csúcsok nemigen különböztethetők meg egymástól. A zengőlemez kisméretű tulajdonságainak vizsgálata régóta nyúlik vissza, az alacsonyfrekvenciás módusok jól megfigyelhetők a lemez egyszerű mozgásformáinak. A magasabb frekvenciák tüzetesebb vizsgálata az utóbbi évekig váratott magára. *Giordano* mérései szerint az impedancia átlagértéke a vizsgált pozíciótól függően 3-7 kHz-ig állandó (átlagértéke 1000 és 10000 kg/s között van), majd onnan kezdve esni kezd [Giordano98]. Ennek az esésnek a magyarázata a merevítő rudakban keresendő. Annak ellenére, hogy a rezonátorlemez merevsége az egyes irányokban merevítő lécek nélkül is különbözik, azok alkalmazása nélkül nem produkálná ezt az eredményt, mert akkor a magasabb frekvenciákon a módussűrűség állandó maradna. *Giordano* szerint ezek az egymással párhuzamos lécek alacsonyabb frekvencián jobban merevítik a rezonátorlemezt, magasabb frekvencián az egyes módusok „beférnek” a bordák közé. Ezt a hatást egy korábbi cikkében numerikus szimulációval is kimutatta [Giordano97].

4.3.1. A rezonátorlemez mérése

Mi a rezonátorlemez mérésekor megfelelő eszközök (shaker) híján erőmérőkalapácsos gerjesztést alkalmaztunk és a híd mozgását gyorsulásérzékelővel mértük. A gerjesztés gyakorlatilag 5 kHz-ig tartalmazott kellően nagy spektrumkomponenseket, tehát

méréseink kb. eddig a frekvenciáig tekinthetők megfelelőnek. Adott pontbeli több mérést összehasonlítva ebben a tartományban az átviteli függvények jó megegyezést mutattak. A 4.7. ábrán az $A_4^{\#}$ húrnál felvett impedancia (F/v) és erő-hangnyomás átviteli függvényeket ábrázoltuk.



4.7. ábra. A rezonátorlemez impedanciája és erő-hangnyomás átviteli függvénye

Ahogy az várható volt, a mérési pont változtatásával változott az impedancia is. Az alsó rezonanciák rendszerint mindig megtalálhatóak voltak, ugyanakkor a nagyobb frekvenciák körül ez nem volt elmondható. Az igen valószínű, hogy ugyanazok a módusok minden pozícióban megtalálhatóak, de az egyes mérési pontokban más módusokat gerjesztettünk, és ezek kiemelkedtek a többi közül.

Könnyű megfeleltetést találni az ábrán az impedancia és hangnyomásgörbék között, a kisfrekvenciás tartományt vizsgálva az impedancia-minimumokban a hangnyomásnak a vártnak megfelelően maximuma van. Magasabb frekvenciák felé a hangnyomásgörbében azonban egyre jobban dominál a rezonátorlemez különböző tartományai által keltett hullámok interferáló hatása, az eredmény tehát nagyban függ a mikrofon pozíciójától. Az általános tendenciák azért így is láthatók, nem is beszélve arról, hogy bárhova tettük a mikrofont, zongorahangot hallottunk, azaz a mikrofon pozíciója inkább csak a hangzás minőségét, és nem a jellegét befolyásolta.

Látható, hogy az impedancia átlagértéke *Giordano* eredményeihez hasonló, mi azonban az impedanciaesést nagyobb frekvenciákon nem találtuk meg, bár ez a mérési módszer hibájából is következhet. Érdeemes lesz tehát a későbbiekben szinuszos gerjesztéssel is vizsgálni a rezonátorlemez mozgását.

4.4. Pedálok

A zongoráknak típusától és mérettől függően kettő vagy három pedálja van. Ezek közül a legfontosabb a jobboldali, a *zengetőpedál*, mely a tompítófilceket az összes húrról felemeli. Ezzel egyrészt kitartja a leütött hangokat, másrészt megváltoztatja a zongora hangzásának karakterét, hiszen a többi húr is szabadon rezeghet. A baloldali az *una corda* pedál, amelynek megnyomásával a billentyűzet oldalirányban eltolódik, így a kalapács a három húr közül csak kettőt üt meg. Ez a hangerősségben alig 1 dB eltérést okoz, de a hangszínt jelntősen megváltoztatja [Fletcher98]. Ennek oka, hogy ilyenkor az egyik húr csak a másik egy vagy két húrtól nyerhet energiát, és ennek eredményeképpen a felfutáshoz képest a hangban lassabb lecsengés tapasztalható [Weinreich77]. A harmadik, középső pedál a *sostenuto* pedál nevet viseli, és csak azokat a hangokat tartja ki, amelyeket megnyomása előtt ütöttek le.

4.4.1. A zengetőpedál hatásának vizsgálata

Mérési szempontból csak a zengetőpedál hatását vizsgáltuk. Erőmérő kalapáccsal ütve a hidat, a pedálnélküli esethez hasonlóan felvettük a rezonátorlemez impedanciáját és hangnyomását. A gyorsulásjelet vizsgálva szembevető, hogy a pedál lenyomásával a rezonátorlemez ugyanazon impulzus hatására jóval tovább rezeg, ám ez az impedancia átlagos menetére nem volt hatással. Az eredeti görbe egy kicsit „cakkosabb” lett, vélhetőleg a húrok rezonanciájának hatására, de a különbség pár dB-en belül maradt (Több mérés eredményét is felrajzoltuk, tehát biztosak lehetünk abban, hogy ez az eltérés nem mérési hiba, hanem ténylegesen a pedál hatása). Az, hogy ez a húrok lecsengési idejét mennyire befolyásolja, kérdéses. Nem valószínű, hogy ez a különbség a gyakorlatban kimutatható, hiszen kis eltérések a lecsengési időben (a fentebb már említett nem azonos eloszlású kalapácsütés és a nemlineáris jelenségek következtében) a pedál nélküli esetben is megfigyelhetőek voltak. Ami a zengetőpedál karakteres hangját adja, az sokkal inkább a sugárzó impulzusválaszána megváltozása. A 3-400 ms hosszú koppanás megmarad, de utána egy nagyon hosszú (tíz-húsz másodperces) zajjellegű lecsengés következik. Ennek az STFT diagramját megvizsgálva (az időbeli felbontás rovására hosszú ablakot alkalmazva), nagyon alacsony amplitúdóval ugyan, de megtaláltuk az eredeti hang harmonikusait, azaz a zengetés hangja erősen függ attól, hogy melyik húr gerjeszti. A mélyebb húrok fele az impulzusválasz mélyebb tónusú, a magasabb hangok fele magasabb hangszínű volt.

Az *una corda* pedál hatását csak szimuláció segítségével vizsgáltuk (úgy állítottuk be a modellt, hogy a kalapács csak az egyik húrt üsse), a lecsengés jellege tényleg megváltozott, de a hangszíne is. Ennek oka Weinreich magyarázatán kívül az is, hogy ha a kalapács csak egy húrt üt meg, az arra a húrre nézve olyan, mintha nehezebb kalapácsot kellene visszalöknie (most a másik húr ugyanis nem hat erővel a kalapácsra), így a kontaktus hossza, és ebből következően a gerjesztés alakja is változik. Véleményünk szerint ez legalább olyan fontos tényező az *una corda* pedál okozta hangzásváltozás kialakulásában, mint a húrok csatolt rezgése.

4.5. Mitől zongora a zongora

Mint láthattuk, a zongorahang kialakulásában számtalan tényező közrejátszik. A hangzás lecsengő jellege abból ered, hogy a zongora *ütött húrú* hangszer, azaz a húr nem folyamatos, hanem *impulzusszerű* gerjesztést kap. Ezen túlmenően a kalapács azáltal, hogy a húrt kb. $1/7$ részénél üti meg, a $7n$ sorszám körüli harmonikusok amplitúdóját nagyban lecsökkenti. Bár ezek a harmonikusok később csatolás útján energiát nyerhetnek, amplitúdójuk mindig alatta marad a szomszédos felhangok amplitúdójának. A hangerő és a hangszín változásáért is a *kalapács* tehető felelőssé, *nemlineáris* viselkedése miatt nagyobb kalapács-sebességeknél a spektrum kiszélesedik és alakja is némileg megváltozik (a spektrumcsúcsok jobbra tolódnak).

A kalapács által bejuttatott mozgási energiát a húr rezgési energiává alakítja, egy részét tárolja, egy másik a hídon keresztül kicsatolódik a rezonátorlemezre, harmadik része pedig disszipálódik. A húr felelős a hang *alapfrekvenciájának* meghatározásáért is, és veszteségei által a harmonikusok lecsengési idejét is befolyásolja. A húr lecsengése és a kicsatolt teljesítmény azonban a *lezárás impedanciájától* is függ. Ahol a rezonátorlemeznek impedancia-maximuma van, ott azok a harmonikusok ugyanannyi idő alatt kevesebb energiát képesek átadni, így a hallható hangban amplitúdójuk kisebb, a lecsengési idejük nagyobb lesz, mint az impedanciaminimumban levő harmonikusokéi.

Rendkívül jellegzetes vonás a zongora hangjában a *diszperzió*, nincs még egy olyan hangszer, amelyben ilyen erősen jelen lenne. A diszperzió következtében a spektrum inharmonikussá válik, magasabb húroknál a *spektrumterpeszkedés* igen jelentős lehet, pl. a 20. harmonikus frekvenciája tipikusan az alapfrekvencia 21-szerese. A szimulációs eredmények azt mutatják, hogy a zongora hangzásában a diszperzió inkább a mély húroknál van jelentősége, ennek oka egyrészt az emberi hallásmechanizmusban, másrészt pedig a jelenlevő harmonikusok számában keresendő.

Az, hogy a húr két transzverzális polarizációja másképpen csatolódik a rezonátorlemezhez, *kettős lecsengés* kialakulásához vezet. Az egyes harmonikusok burkológörbéje a megszólalás után egy ideig meredeken, majd lankásabban csökken. Az azonos hang megszólaltatásáért felelős két vagy három enyhén széthangolt húr a hangban *lebegést* okoz, a húrok közötti bonyolult csatolás következtében az amplitúdó nem egyszerűen szinuszosan változik, hanem sokkal összetettebb görbét jár be. A húrban a feszítőerő változása miatt fellépő longitudinális hullámok is befolyásolják a zongora hangzását, de inkább csak negatív irányban. A valóságban a három húr és a három polarizáció egy összefüggő, nemlineárisan csatolt rendszert alkot, ennek köszönhető a hangzás lecsengés közbeni dinamikus változása.

A *rezonátorlemez* a lecsengési időközön kívül a spektrum egészére is befolyással van. Viselkedése jó közelítéssel lineárisnak tekinthető, a *nagyszámú rezonancia* azonban a hangzás jellegét jelentősen megváltoztatja. A hangszer megszólalásakor hallható, oly jellemző „*koppanás*” is részben a rezonátorlemeznek köszönhető, hiszen a rezonátorlemez átviteli függvénye kis frekvenciákon jó pár éles rezonanciával rendelkezik.

Az előbb felsorolt hatások listája korántsem teljes, ám ezek azok, amelyek a zongorahang alapvető karakterét meghatározzák. Még tovább szűkítve a kört, a

kalapácsütés jellegzetességein kívül a hangzás meghatározásában a diszperzió a legnagyobb jelentőségű, a többi jelenség inkább a hang minőségének befolyásolásáért felelős.

A zongora analízise után tehát rátérhetünk a zongorahang szintézisére.

5. fejezet

A zongorahang szintézise

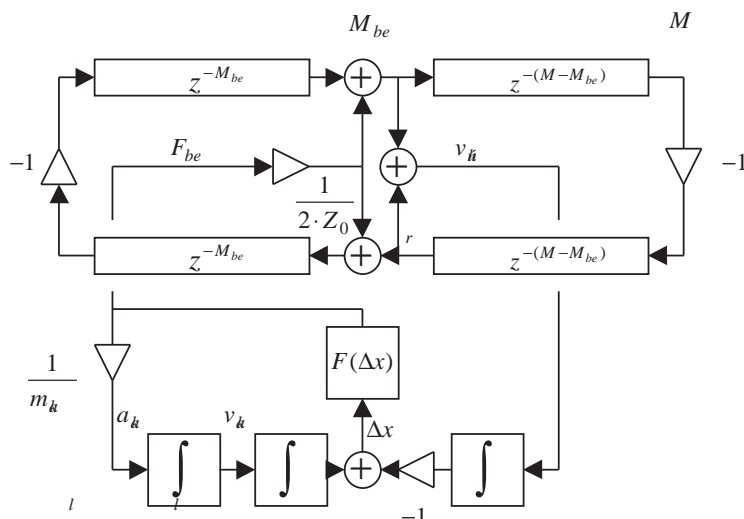
A zongorahang fizikai modell alapú szintézisének gyakorlati megvalósításával tudomásunk szerint mindeztidáig egyetlen szerzőpáros (*Smith* és *Van Duyne* [Smith95], [Van Duyne 95]) foglalkozott. Mások inkább a zongora egyes különálló részeinek simulációját végezték el, a hangszer működésének jobb megértése céljából. Ezt a két megközelítést mindenképpen érdemes különválasztani, hiszen a hangszerben végbe-menő fizikai hatások feltérképezéséhez a modell pontossága, a hangszintézis esetében azonban a számításigény a döntő jelentőségű. Utóbbi esetben minden olyan elhanyagolással élnünk kell, amely nem jár a hangszín jelentős változásával, mégha az így kialakult struktúra veszít is fizikai jelentéséből. Jelen dolgozatunkban elsősorban a hangszintézis megvalósíthatóságának vizsgálatára koncentrálnunk. Leírásunk a jobb áttekinthetőség kedvéért a zongoráról szóló fejezet által megszabott sorrendet követni. Ugyanezen cél elérése érdekében az egyes alfejezetekben a már elkészült és a megvalósításra váró elemek együtt kerülnek tárgyalásra. Részletesen kitérünk az általános jelfeldolgozási problémák megoldására, mert reméljük, hogy ötleteink más jellegű feladatok megoldásában is segítséget nyújthatnak.

5.1. A kalapácsmodell

A kalapácsütés hatását két módszerrel vizsgáltuk. Ez először a húr elemi tömegpontokból és rugókból felépített modelljével történt, a kalapácsot pedig egy tömegpont és egy lineáris rugó kombinációjaként vettük figyelembe. A modellben a kalapácsnak kezdeti sebességet adva az (rugó felőli végével) alulról a húrnak ütközött. A húr pontjainak adott időpontbeli helyzetét az így adódó differenciaegyenletet lépésenkénti megoldásával kaptuk. A húr pontjait a képernyőn megjelenítve jól követhető volt a kölcsönhatás menete, az, ahogy a húrvégről visszaverődő reflexiók ellökik a kalapácsot. Következő lépésként az ideális waveguide alkalmazásával próbálkoztunk, a húr mozgása nagy hasonlóságot mutatott az elemi tömegpontok alkotta modellhez, ez mindkét megközelítés helyességét igazolta. Mivel számítási szempontból a waveguide modell sokkal előnyösebbnek bizonyult, a továbbiakban ezt alkalmaztuk.

A modellünk a következőképpen működik: a húr és a kalapács helyzetének megfelelően kiszámítja a húrra és a kalapácsra ható erőt, majd ezt bejuttatja a waveguide-

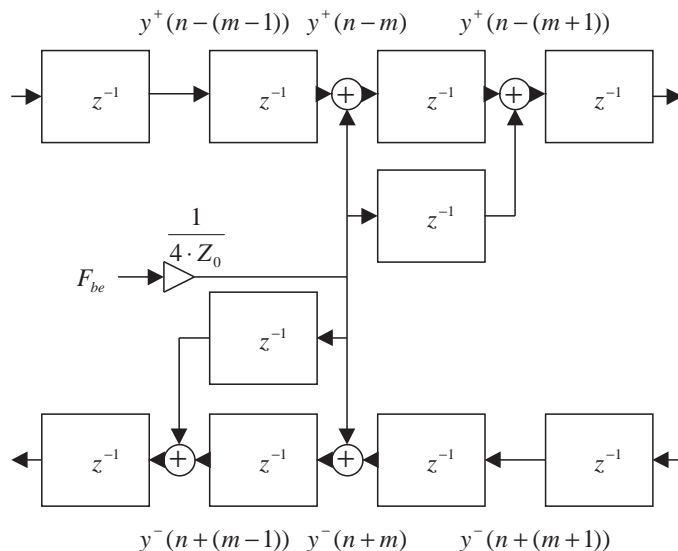
ba. A húr új pozícióját az egyes késleltetővonalak eggyel történő léptetésével határozza meg (mivel a waveguide-ban sebesség dimenziójú változókat tárolunk, a húr kitérését időbeli integrálással kapjuk). A kalapácsra ható erőből kiszámítható a kalapács gyorsulása, majd kétszeri időbeli integrálás után az új pozíciója. A kalapács és a waveguide összekapcsolását szemlélteti az az 5.1. ábra.



5.1. ábra. A waveguide és a kalapács összekapcsolása

Az ábráról a jobb átláthatóság kedvéért hiányzik egy fontos kiegészítés. Az erőt visszacsatolt nemlineáris kölcsönhatás szimulációja esetén nem juttathatjuk be ilyen egyszerűen a késleltetővonalakba. Ha elképzeljük, hogy a kalapács egyetlen diszkrét *Dirac-impulzust* juttat be a húrmodellbe, a bejuttatás pozíciójában a húr sebessége az impulzus nagyságának a kétszerese lesz, ahogy azonban az impulzusok továbbhaladnak a lezárások felé, nagyságuk megegyezik a bejuttatott impulzus amplitúdójával. A húr sebességét időben integrálva a húr helyzetében a kalapács megütésének helyén *diszkontinuitást* találunk, mely a húr rezgése során végig megmarad. Ha a gerjesztőjelünk adott, ez az eredményünket nem befolyásolja, hiszen a húr csak a megütés pontjában viselkedik helytelenül, az összes többi pontban (így a hídnál is) helyes értékeket kapunk. Ez lehet az oka, hogy a probléma elkerülte az irodalom figyelmét. Olyan gerjesztés esetén azonban, ahol a húr helyzete visszahat a gerjesztőjel alakulására, ez helytelen eredményre vezet. A probléma a húr térbeli és időbeli mintavételezéséből ered, a folytonos húrba bejuttatott két, ellentétes irányba haladó analóg *Dirac-delták* ugyanis a gerjesztés helyének megfelelő térbeli lépésközben csak feleannyi ideig tartózkodnak, mint a többi szakaszban (mivel az adott szakasz közepéről indulnak). Ezt a waveguideban úgy valósíthatjuk meg, hogy a gerjesztés pozíciójában csak a gerjesztőjel felét juttatjuk be a késleltetővonalakba, a másik felét időben eggyel késleltetve és a terjedési iránynak megfelelően egy térbeli lépéssel eltolva adjuk hozzá az addigra odaérő eredeti impulzusunkhoz. Bár apróságnak tűnhet, hangsúlyoznunk kell, hogy nemlineáris kölcsönhatások szimu-

lációjánál csak így kapunk helyes eredményt. A gerjesztőjel helyes bejuttatásának módszerét szemlélteti az 5.2. ábra.



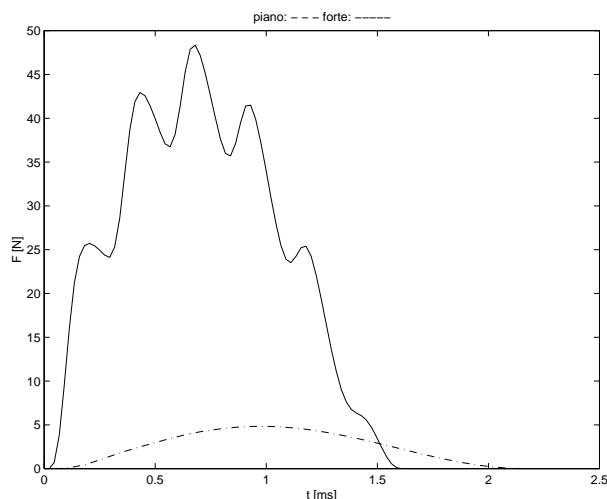
5.2. ábra. Az erő bejuttatása

A kalapács erejének kiszámításakor először lineáris rugó alkalmazásával próbálkoztunk, ez azonban nem vezetett megfelelő eredményre. Ilyenkor ugyanis a rendszer is lineárisan viselkedik, az erőimpulzus alakja a kalapács kezdeti sebességétől függetlenül állandó marad, csak a nagysága változik, ellentétben a zongorahangra jellemző spektrumváltozással. Az irodalomban történő kutatás és a szimuláció meghallgatása után a (4.1) szerinti képlet alkalmazása mellett döntöttünk. A kalapács adatait (K, p, m) szintén az irodalomból vettük [Chaigne94b], de azok szükség esetén görbeillesztéssel a méréseinkből meghatározhatók. Jelen kalapácsmodell hiányossága, hogy nem veszi figyelembe a kalapács veszteségeit, a filc viselkedésében megtalálható *hiszterézis*. A hiszterézis következtében a filc összenyomáskor keményebbnek tűnik, mint kitáguláskor. A jelenség modellezésére egy viszonylag egyszerű módszert ajánl *Buotillon*: a kitevő értékét minden irányváltotatáskor Δp értékkel növelve a hiszterézis figyelembe vehető, K -t pedig úgy kell beállítani, hogy a görbe folytonos maradjon [Boutillon88]. A későbbiekben tervezzük a hiszterézis modellünkbe történő beépítését és hatásának vizsgálatát is.

Azáltal, hogy a nemlineáris rugóból és tömegpontból álló kalapácsnak csak a kezdeti sebességét adjuk meg, figyelmen kívül hagyjuk a mechanika dinamikai tulajdonságait. Kalapácsunk azonban egy (immár lineáris) rugóval és egy további tömegponttal történő kiegészítéssel a zongora leírásánál tárgyalt kalapácsrezonancia szimulációjára is alkalmassá tehető. Még pontosabb kalapács- és mechanikamodell alkalmazása esetén talán lehetőség nyílna annak a máig vitatott kérdésnek a megválaszolására is, hogy képes-e a művész a kalapács ütközési sebességén kívül a hangszínt más módon is befolyásolni.

Viszonylagos egyszerűsége ellenére a kalapács viselkedésének figyelembevétele jelentősen a legnagyobb eltérést a többi szintézismódszertől, hiszen ez az, ami a kimeneti jel spektrumát a leütési sebességnek megfelelően (ideális esetben helyesen) befolyásolja. Más módszerek alkalmazása esetén erről magunknak kell gondoskodnunk.

Az 5.3. ábrán látható diagram az A_4^{\sharp} húr megütésének szimulációját ábrázolja *piano* és *forte* megütés esetén (a megfelelő kalapácssebességek: 0.5 ill. 4 m/s).



5.3. ábra. A kalapácsütés szimulációja

Az erő jellege nagy hasonlóságot mutat a mért eredményekhez (lásd a 4.2. ábrát), a kis eltérés oka egyrészt a mért kalapács nagyobb tömege (a felerősített gyorsulásérzékelő miatt), másrészt pedig az, hogy a kalapács paramétereit az irodalom, és nem a mérési eredmények alapján állítottuk be.

Itt érdemes megemlíteni a *Smith* és *Van Duyne* által kidolgozott „lineáris” kalapácsmodellt [Smith95], [Van Duyne 95]. Módszerük a kölcsönhatás nemlineáris szimulációjával meghatározza a különböző húrokhoz és kalapácsokhoz tartozó erőjeleket, majd ezekre (vagy az idő, vagy a frekvenciatartományban) szűrőt illeszt. Ha az illesztés megfelelő, a szűrő impulzusválasza jó közelítéssel a gerjesztést adja. A módszer előnye, hogy bár a szűrőparaméterek a kalapács kezdeti sebességének nemlineáris függvényei, adott megütési sebesség esetén az adott hangra ez a szűrő lineárisnak és időinvariánsnak tekinthető. Ez a lineáris tulajdonság a sugárzó átviteli függvényének modellezésében jelent nagy segítséget, hiszen a lineáris rendszerekre érvényes *kommutatívitas* miatt megtehetjük, hogy a hangszer építőköveit felcseréljük. Jelen esetben a hang kialakulásának menetével ellentétben először a sugárzó szűrőkarakterisztikáját vesszük figyelembe, a kalapács és a waveguide által okozott szűrés pedig csak ezután következik. A sugárzó impulzusválasza első közelítésben minden hangra megegyezik, így szűrővel történő modellezése helyett elég annak felvett mintáit egy memóriából a kalapács szűrőjén keresztül a waveguide-ba „játszani” [Smith95], [Van Duyne 95]. A módszer hátránya, hogy szakít a fizikai képpel, így a kalapács-szűrő paramétereit előre ki kell számítani és tárolni kell. További hát-

rány, hogy az olyan jellegzetességek, mint például a már rezgésben lévő húr újbóli megütése (amely a mi modellünknek nem jelent gondot), ezzel a módszerrel nem szimulálhatók.

5.2. A húrmodell

A zongorahúr pontos modellezése komplex feladat, amely túlmutat a valós idejű megvalósíthatóság keretein, ezért egyszerűsítésekkel kell élnünk. Jelen esetben ez egyetlen (a rezonátorlemezre merőleges transzverzális) polarizáció figyelembevételét jelenti. A húr rezgésének modellezésére a 3. fejezetben ismertetésre került waveguide modellt használtuk. Mint ahogy az előző részben rámutattunk, a waveguide a lineáris szűrőhatás (rezonátor) megvalósítása mellett a gerjesztés előállításában is szerepet kap. Ha a gerjesztőjel mintáit (a bemeneti erőjelet) rögzítjük, és később ezt töltjük a waveguide-ba, ugyanazt az eredményt kapjuk. Ilyen módon gondolatban szétválaszthatjuk a waveguide két funkcióját. Ebben a megközelítésben a waveguide az általánosságban vett szubtraktív szintézis speciális esetének tekinthető, hiszen egy adott gerjesztőjeltől lineáris szűréssel állítjuk elő a zongorahangot.

5.2.1. A jel paramétereinek meghatározása

A paraméterek meghatározásánál a waveguide analízisének bemutatott módszer inverzét követtük, azaz a lecsengési idők és a frekvenciaértékek alapján terveztük meg a reflexiók szűrőt.

Az analízis alapjául nem a hangnyomásjelet, hanem a híd rezonátorlemezre merőleges *gyorsulását* választottuk. Mivel a waveguide paramétereinek szempontjából a harmonikusok kezdeti amplitúdójának nincs jelentősége (azt a gerjesztés és a sugárzó határozza meg), ez minden negatív következmény nélkül megtehető, sőt, jelen esetben még bizonyos előnyökkel is járt. Egyrészt az így kapott jel a hangnyomásjelhez képest több magasabb harmonikust tartalmazott (hiszen a hangnyomás sokkal inkább a híd sebességével, mint a gyorsulásával arányos), másrészt pedig az analízist zavaró tényezők (longitudinális hullámok, koppanás) ebben a jelben kevésbé voltak jelen. Mivel az analízis során a jelet exponenciálisan lecsengő szinuszos összegeként próbáljuk modellezni, annál jobb eredményt kapunk, minél jobban hasonlít a jel a feltételezett modellünkre. Az így kapott adatok (a kezdeti amplitúdók meghatározásával) közvetlenül használhatók *additív szintézis* megvalósítására. Hasonlóan egyszerű a dolgunk a *rezonátoros struktúra* választásakor, ilyenkor azonban a kezdeti amplitúdókat nem a jelből határozzuk meg, hanem azok a gerjesztésnek (kalapácsütés) és az a_k együtthatóknak megfelelően alakulnak. (Ez jelenti a legfőbb eltérést az additív szintézistől, míg az egy statikus, bemenet nélküli modell, a rezonátorok által keltett hangzás a gerjesztőjel függvénye, sőt, a rezonátoros struktúra egy késleltetősor hozzáadásával nemlineáris kölcsönhatások figyelembevételére is alkalmassá tehető). Az analízisre az irodalomban két alapvető módszert találunk. Ezen módszerek egyike a *rövid idejű Fourier transzformáció* (STFT) alapul. A jelet a periódushossz egészszámú többszörösének megfelelően ablakozva és a diszkrét Fou-

rier transzformációt elvégezve a spektrum időbeli szeleteit kapjuk (ezt a módszert alkalmaztuk a zongora hangjának 3 dimenziós megjelenítésénél). Az egyes spektrumcsúcsokat megkeresve azok amplitúdója és frekvenciája meghatározható. A pontosabb eredmény érdekében érdemes az ablakméretnél nagyobb pontszámú DFT-t alkalmazni, mert az a pontok közötti interpolációt automatikusan elvégzi. Tovább javíthatjuk az eredmény pontosságát a pontok közötti parabolikus interpolációval [Välimäki96]. A módszerek másik csoportja az egyes frekvenciákat külön-külön vizsgálja. Ez pl. *heterodin szűréssel*, vagy a *Hilbert-transzformáció* alkalmazásával történhet. Az előbbi esetben a vizsgált komponens egy egységnyi hosszúságú komplex forgóvektorral megszorozva, majd azt egy aluláteresztő szűrőn áteresztve és abszolútértéket képezve megkapjuk a jel burkológörbét (pl. [Välimäki98]). Ezzel ekvivalens, bár számításigényesebb módszer a Hilbert-transzformáció alkalmazása, ahol először egy sávszűrővel kiválasztjuk a kívánt harmonikust, majd a Hilbert transzformáció segítségével előállított analitikus jel abszolútértékét képezzük [Márkus99]. Ez utóbbi két módszer alkalmazásával, annak következtében, hogy a jelet csak a harmonikusok környezetében vizsgáljuk, a DFT-hez képest jelentős számítási-sebesség növekedést érhetünk el.

Egyszerűsége és számítási gyorsasága miatt a heterodin szűrése alapuló megoldás mellett döntöttünk. Az irodalom által tárgyalt módszerek azonban olyan jelekre vonatkoznak, amelyek komponensei az alapfrekvencia pontosan egész számú többszörösei, a zongorára azonban a diszperzió megléte miatt ez a feltétel nem teljesül. Ha jelünket az alapfrekvencia többszöröseinél vizsgáljuk, az első pár harmonikus után helytelen eredményt kapunk. Meg kellett tehát oldani a jel amplitúdójának mérése mellett a frekvencia mérését is.

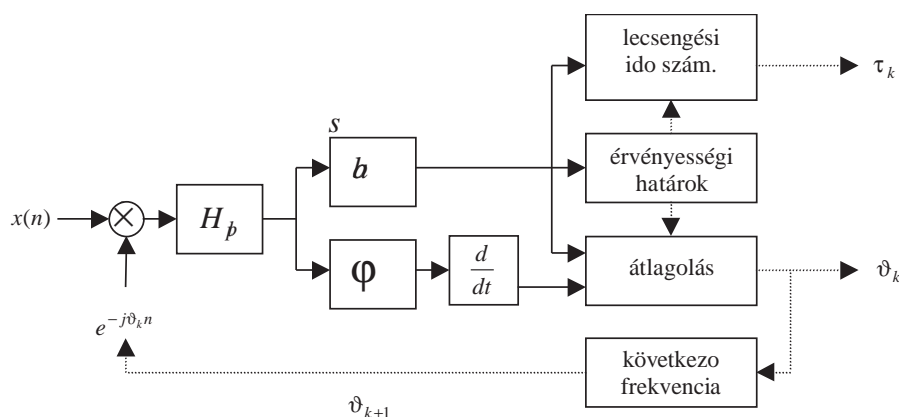
A program az alapharmonikus frekvenciája alapján (ezt ismerjük, hiszen tudjuk, milyen hangról készült a felvétel) egy komplex exponenciálissal DC közelébe keveri majd egy aluláteresztő szűrő segítségével kiszűri a többi komponens. A maradék jel egy komplex forgóvektor, amelynek amplitúdója megfelel az eredeti komponens amplitúdójának (egy 2-es szorzó erejéig). A jel pillanatnyi frekvenciáját a forgóvektor fázisából határozzuk meg. A fázist idő szerint differenciálva és ahhoz a keverőjel frekvenciáját hozzáadva megkapjuk a tényleges pillanatnyi frekvenciát. Az adott harmonikus átlagos alapfrekvenciáját az így kapott pillanatnyi frekvenciák átlagolásával határozzuk meg, ehhez azonban először az adatok érvényességének határait kell megállapítani. Programunk e célból először megnézi a már lekevert, szűrt időbeli rekord utolsó részének amplitúdóját (itt már csak zajt találunk), és csak addig veszi érvényesnek az adatokat, amíg azok 10 dB-lel az utolsó rész maximuma felett vannak. Ezek után a pillanatnyi frekvenciák érvényesség tartományon belüli, amplitúdóval súlyozott átlagolása következik, így a kevésbé zajos tartományok az eredményre nagyobb befolyással bírnak. A lecsengési idő meghatározása ugyanezen rekordon belül történik. Az amplitúdó logaritmikus skálán történő ábrázolásával az exponenciális görbék egyenesekké válnak, így lehetőségünk nyílik a lineáris regresszió alkalmazására.

Az alapharmonikus analízise után a program a következő harmonikust a mért alapfrekvencia kétszeresénél keresi. Az ezt követő keverési frekvenciákat viszont

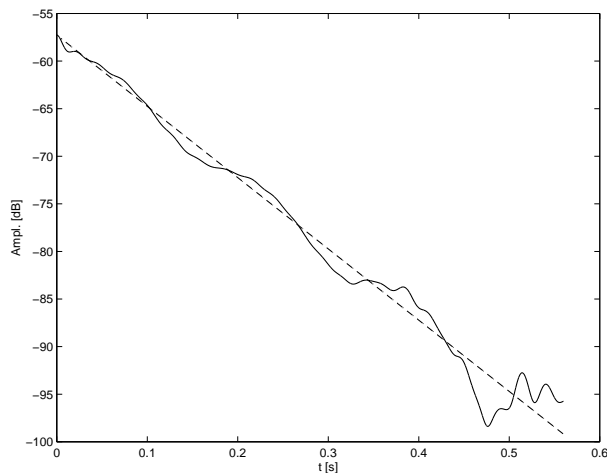
az előző két harmonikus frekvenciájának különbsége alapján határozza meg ($f_k = 2f_{(k-1)} - f_{(k-2)}$), így tulajdonképpen követi a diszperzió okozta spektrumterpeszkedést.

Az időbeli és a frekvencabeli felbontás tekintetében ismét kompromisszumot kell kötnünk. A szűrőnek mindenképpen elég keskenynek kell lennie ahhoz, hogy a vizsgált frekvencia melletti harmonikusokat kellő elnyomással kiszűrje, mert azok jelenléte az eredményeket (főleg a frekvencia mérését) bizonytalaná teheti. Ilyen szempontból ideális lehet az egyszerű *csúszóablakos átlagoló*, ha hosszát a harmonikusok különbségi frekvenciájának megfelelően választjuk (ez utóbbit az előző mérésünkből becsülhetjük). A négyszögablakhoz hasonlóan jó tulajdonsággal rendelkezik a *Hanning-ablak*. Bár ott az első leszívás nem található meg, a különbségi frekvenciából adódó periódushossz egészszámú többszörösét véve a szomszédos harmonikusoknál ideális esetben szintén zérus átvitelt kapunk. A Hanning-ablak további előnye, hogy frekvenciabecslőnk pontatlansága kevésbé befolyásolja a mérés eredményét. A fenti érvek ellenére a programban *Butterworth IIR* szűrőt használtunk, egészen egyszerűen gyorsasága miatt. Bár az eredmények így veszítenek valamennyit pontosságukból, a vizsgálat ideje nagyban lecsökken. Míg a *Hanning-ablak* alkalmazása 1000 körüli foks számú FIR szűrőnek felel meg, a kellő elnyomás eléréséhez az esetek többségében már egy *negyedfokú IIR* szűrő is elegendő. A szűrő sáv szélességét a hang alapfrekvenciájától függően állítottuk be, túl nagy sáv szélesség zajos, zavaros eredményekhez, túl kicsi pedig a magasabb harmonikusoknál pontatlan lecsengési időkhöz vezetett (a gyorsan lecsengő felhangoknál a program ilyenkor nem a burkológörbékre, hanem a szűrő impulzusválaszára illeszt egyenest). Ugyan a szűrő fázistolása az eredményeinket nem befolyásolta volna, a tisztesség kedvéért a szűrést a Matlab *filtfilt* utasításával végeztük el, amely a lineáris fázis menetet a rekord kétirányú (oda-vissza) szűrésével biztosítja.

Az eljárás blokkdiagramja a 5.4. ábrán, az A_4^{\sharp} hang 10. harmonikusának burkológörbéje és a ráillesztett egyenes pedig az 5.5. ábrán látható.



5.4. ábra. Az analízis blokkdiagrammja



5.5. ábra. Példa a lecsengési idő meghatározására

5.2.2. Szűrőtervezés

Az analízis eredményeül kapott paraméterek alapján meghatározhatjuk a waveguide végére illesztendő szűrőnket. Ennek tartamaznia kell a veszteségek és a diszperzió hatását, továbbá az alapfrekvencia megfelelő beállításához korrigálnia kell a waveguide hosszát, mivel az csak egészszámú késleltetőkből állhat. A fenti eljárással kapott adatok tulajdonképpen egy komplex specifikációt határoznak meg, ez alapján a szűrő elvileg rögtön megtervezhető. Ehhez azonban a tervezés amplitúdó- és fázishibáját külön kellene választanunk, hiszen azoknál más és más feltételek teljesítésére van szükség. Míg az amplitúdó kicsi hibája is nagy gondokat okoz (az egész modellt instabillá teheti), a fázis apró eltérése nem jelent különösebb problémát. Ha a fázismenet kellően sima, az eredmény megfelelő lesz (bár nem ugyanazt a diszperziót kapjuk, ha a görbe jellege megfelelő, a hangzás zongoraszerű marad). Ezen nehézségek elkerülésére javasolja az irodalom [Smith92], [Välimäki96] az egyes szűrőtervezési fázisok szétválasztását. A veszteségekért felelős szűrő átvitelének gondos megtervezésével és a diszperzió megvalósítására mindentáteresztő szűrő alkalmazásával biztossá tehető, hogy az oly kritikus amplitúdómenetért egyetlen, jól megtervezett szűrő a felelős. Mivel a veszteségi szűrő aluláteresztő jellegű, ezért ott, ahol átvitele közel egy, ott az általa okozott fázistolás a diszperziós szűrőhöz képest elhanyagolható. Először ez utóbbi szűrő tervezésének menetét tekintjük át.

5.2.3. A veszteségi szűrő tervezése

A lecsengési idők értékeiből r_f -ek abszolút értékét az egyes frekvenciapontokban (3.12) inverzével számíthatjuk, ezek és az adott frekvenciapontok megadják a szűrő specifikációját. (A továbbiakban r_f abszolútértékét g_k -val jelöljük.) Az erre történő szűrőillesztés nem triviális, hiszen a reflexiós tényező abszolút értéke 1 körüli, ha azonban a tervezett szűrő amplitúdómenete a rezonanciafrekvenciákon az 1-et meghaladja, a waveguide hurok instabillá válik. A lecsengési idő is nagyobb mértékben

változik g_k ugyanolyan mértékű változásával, ha g_k 1 közelében van, tehát jelen esetben négyzetes hibára vagy minimax kritériumra történő minimalizálás nem eredményez megfelelő megoldást. Az értékek hibájának ügyes súlyozásával jobb eredményt érhetünk el, de így sem kapunk robusztus algoritmust.

A problémát a gitár szintézisének esetében *egypólusú szűrő* alkalmazásával oldották meg, amely két paraméterének (amplitúdó és vágási frekvencia) meghatározása saját algoritmussal történt (pl. [Välimäki96]). Az alacsonyabb harmonikusok a magasabbaknál jóval nagyobb súlyozást kaptak, hiszen a hang általános lecsengési idejéért leginkább az előbbiek a felelősek. Az elsőfokú, egypólusú szűrő alkalmazása a szintézis során is nagy számítási előnyöket nyújt. Az egyszerű szűrő alkalmazása ellenére a modell meglepően élethű hangot produkál. Kíváncsiak voltunk, mi lehet ennek az oka, mivel az irodalomban semmilyen erre vonatkozó elvi indoklást nem találunk. (Valószínűleg alacsony számításigénye miatt döntöttek alkalmazása mellett). Szerettünk volna a praktikussági szempontoknál megnyugtatóbb választ kapni a kérdéseinkre, így magunk értünk a válasz nyomába. A szűrő átviteli függvényét az analóg tartományba transzformáltuk, majd felírtuk a kapott analóg szűrő amplitúdómenetét, kihasználva, hogy az analóg tartományban kapott pólus a vizsgált frekvenciák felett van. Az így kapott átvitelből a lecsengési időt közelítően kiszámolva a következő alakú függvényt kaptuk:

$$\tau = \frac{1}{c_0 + c_2\omega^2}. \quad (5.1)$$

Ez pedig nem más, mint az elsőfokú és a harmadfokú veszteségi tagokat tartalmazó húr lecsengési ideje (lásd pl. [Chaigne94a]). Valószínűleg ennek az egybeesésnek köszönhető, hogy a modell már elsőfokú szűrő esetén is természetesen szól. A sok elhanyagolás ellenére a két függvény görbéje Matlab-ban felrajzolva szinte egymáson fut, persze ennek feltétele, hogy a diszkrét szűrő pólusa 0 közelében legyen (az előírt lecsengési idők következtében ez teljesül is). Ilyen körülmények között az egypólusú szűrő egy egyszerű taggal is helyettesíthető, a zérus az eredeti pólus origóra vett tükörképe lesz.

Bár a modellünk hangja elsőfokú szűrő esetén is sokkal kellemesebb volt, mint egyszerű konstans szorzás alkalmazásával, szerettük volna tovább pontosítani az approximációt. Ehhez azonban egy új szűrőtervezési módszer kidolgozására volt szükség. Az eddigi megközelítések különböző súlyozófüggvényeket ajánlanak, de ez nem biztosítja az algoritmus stabilitását. Az ötletünk, az előzőekkel ellentétben, a szűrő és a specifikáció transzformációján alapul. Abból a fizikailag indokolható képből indul ki, hogy nem a g_k együtthatók, hanem a *lecsengési idők hibáját* kellene minimalizálni. Felhasználva, hogy g_k értéke 1-hez közeli, (3.12)-ből levezettük, hogy a lecsengési idők kívánttól való eltérésének négyzetösszege minimális lesz, ha a specifikációt a következő alakra hozzuk:

$$g_{tr} = \frac{1}{1 - g_k} \quad (5.2)$$

Ezt minden egyes frekvenciapontra elvégezve és a hiba négyzetösszegét minimalizálva terveztük meg a transzformált szűrőnket (H_{tr}). (Ebből a célból bármelyik

hagyományos szűrőtervező program használható, mi a Matlab *invfreqz* függvényét választottuk.) A veszteségi szűrőt ebből a következőképpen kapjuk meg:

$$H_{g_k}(z) = 1 - \frac{1}{H_{tr}(z)} \quad (5.3)$$

Szükség esetén az előírt és a kapott lecsengési idők arányának 1-től való eltérését is minimalizálhatjuk, ilyenkor az azonos súlyok helyett $(1 - g_k)^2$ súlyozást kell alkalmazni. A két megközelítés közül az első hozott jobb eredményt. Ennek oka, hogy az alapharmonikus lecsengési idejének egy felsőbb harmonikussal megegyező arányú eltérése abszolút értékben sokkal nagyobb időkülönbséget jelent, és az alapharmonikus burkológörbéjének hibája a hang átlagos lecsengési idejére is közvetlen hatással van.

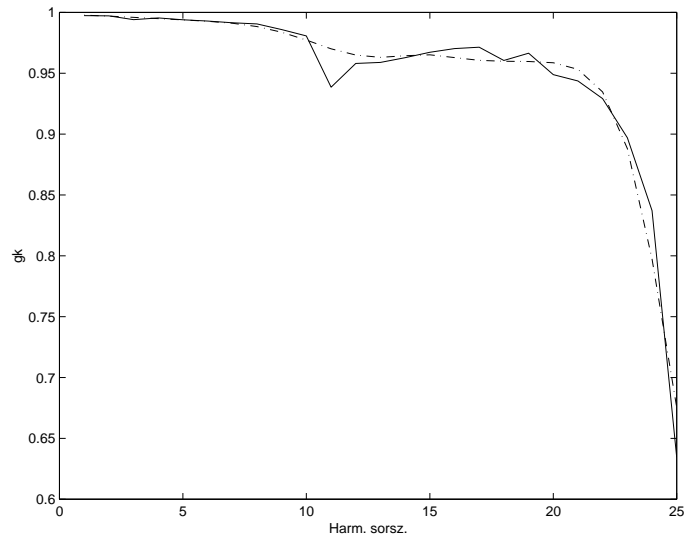
Az alkalmazott transzformáció biztosítja, hogy a specifikáció által előírt pontokban az átvitel nem lesz nagyobb 1-nél. A pontok között azonban, ha a transzformált átviteli függvény (H_{tr}) negatív, a reflexiós szűrő 1-nél nagyobb értéket vesz fel. Bár ennek elvileg nincs jelentősége (a waveguide csak a tervezési pontoknak megfelelő frekvenciákat emeli ki), érdemes ezt elkerülnünk (ha a waveguide frekvenciáit nem sikerült pontosan beállítani, gondban lehetünk). Amennyiben az előírt pontokhoz képest nem adunk meg a tervezőprogramnak túl nagy fokszámot (ez a szimuláció számításigényét is megnövelné), a transzformált átviteli függvény kellően sima lesz és így a reflexiós szűrőnk átviteli függvényének abszolútértéke mindig kisebb lesz 1-nél (ez nagyobb fokszám esetén további specifikációs pontok hozzáadásával biztosítható, amelyeket az eredeti pontok közötti interpolációval határozhatunk meg).

Előfordul, hogy a tervezőprogram (jelen esetben az *invfreqz*) által tervezett szűrő átviteli függvénye megfelelő alakú, de néhány pólusa az egységkörön kívülre esik. A szűrőt az amplitúdómenet megváltoztatása nélkül stabillá tehetjük a körön kívüli pólusok egységkörre tükrözésével (*inverzióval*), hasonlóan ahhoz, amit a zérusokkal teszünk egy diszkrét idejű rendszer minimálfázisú és mindentáteresztő rendszerré történő dekompozíciójában. Most az átviteli függvényünket tulajdonképpen egy stabil átviteli függvényre és egy instabil mindentáteresztőre bontjuk, majd a mindentáteresztőt elhagyjuk. Ha ugyanezt a zérusokra is elvégezzük, egy stabil minimálfázisú átviteli függvényt kapunk. Ez a fázismentes viselkedését is garantálja, hiszen a minimálfázisú rendszer fázismentes és amplitúdómenetének logaritmus (ami jelen esetben kellően sima) *Hilbert-transzformált párt* alkot [Oppenheim75].

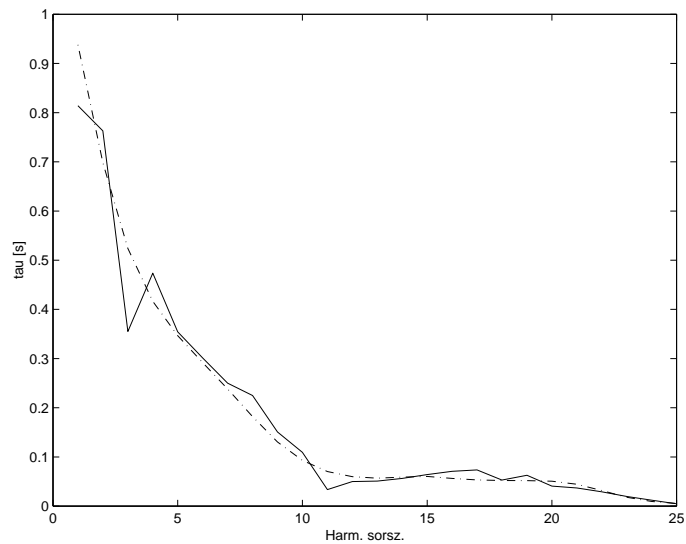
A következő ábrákon (5.6–5.7) az A_4^{\dagger} hang lecsengési idejére illesztett 10-edfokú IIR veszteségi szűrő átvitele és a visszaszámolt lecsengési idők láthatók (szaggatott vonal), a specifikáció görbéjének (egyenes vonal) feltüntetésével.

5.2.4. A diszperziós szűrő

A diszperzió hatását mindentáteresztő szűrővel vesszük figyelembe, ezzel biztosítva, hogy nem rontjuk el a már jól beállított lecsengési időinket. A harmonikusok frekvenciáinál, ahogy a waveguide analízisének láttuk, (3.14)-nek kell teljesülnie. Ebből kiindulva a waveguide effektív hossza (azaz az adott frekvencián ennyit kell késleltetnie az összes kiegészítő szűrővel együtt):



5.6. ábra.
a veszteségi szűrő átvitele az egyes harmonikusok frekvenciáinál, a specifikáció feltüntetésével



5.7. ábra. Az előírt és a szűrő által megvalósított lecsengési idők

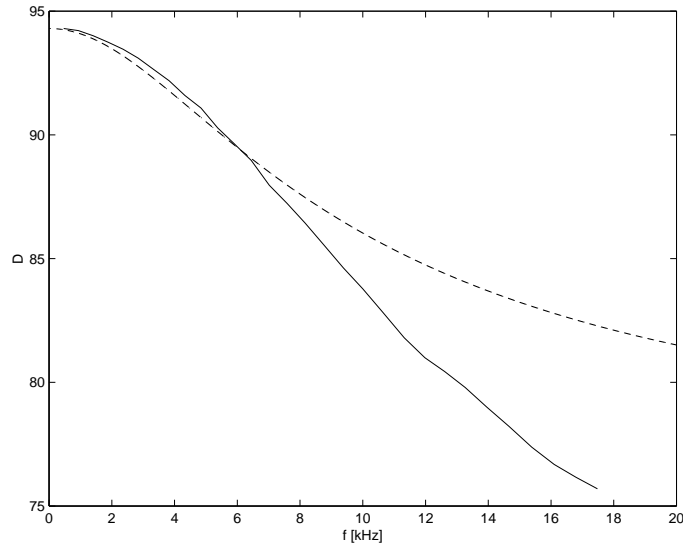
$$D_{\text{eff}}(f_k) = \frac{f_s k}{f_k} = D_{\text{má}}(f_k) + D \quad (5.4)$$

ahol f_s a mintavételi frekvencia, k az adott harmonikus sorszám, f_k pedig a frekvenciája. Ez tulajdonképpen a szűrőnk fáziskésleltetésére vonatkozó specifikáció, amelynek egy része egy mindentáteresztő szűrő ($D_{\text{má}}(f_k)$) alkalmazásával, a másik pedig elemi késleltetők sorbakapcsolásával (a tényleges waveguide-dal) áll elő. Diszperz harmonikusok esetére ez az előírás mindig monoton csökkenő jellegű. (A veszteségi szűrő fázistolása elhanyagolható mértékű, így azt a tervezésnél nem vettük figyelembe, ha azonban erre mégis szükség van, annak fáziskésleltetését a specifikációból egyszerűen ki kell vonni.)

Mindentáteresztő szűrők tervezésére nem találtunk általánosan használható kész programot, bár az irodalomban (pl. az *IEEE* folyóirataiban) gyakran jelennek meg cikkek a témában. Ennek talán az az oka, hogy nincs még kiforrott, jól bevált algoritmus a probléma megoldására. Általános esetben nem triviális a konstans késleltetés (D) megválasztása sem, pedig ez a tervezés feltételeit nagyban befolyásolja.

Mi egyszerűsége és robusztussága miatt *Van Duyne* és *Smith* ötletét követtük [Van Duyne 94]. Megoldásuk annak a felismeréséből indul ki, hogy az elsőfokú mindentáteresztő (részletes analízisét lásd [Välimäki95]-ben) fáziskésleltetésének görbéje nagyon hasonló alakú az általunk megkívánthoz. A diszperziós szűrőt több, azonos együtthatójú elsőfokú mindentáteresztő tagból felépítve a kívánthoz hasonló késleltetést kapunk, ugyanakkor az azonos együtthatók feltételezése tervezésünket nagyban leegyszerűsíti. Programunk az átadott frekvenciapontok és a fokszám (azaz hogy hány elsőfokú tagból állítsa össze a szűrőt) alapján a súlyozott négyzetes hibát minimalizálva beállítja az elsőfokú tagok egyetlen paraméterét. A konstans késleltetés (D) meghatározása majd csak a törtrész-késleltető tervezésénél történik, mivel a hiba kiszámításánál a program a szűrő késleltetésének maximumát a specifikáció maximumához illeszti. Egy ilyen szűrőtervezés eredménye (szaggatott vonal) látható a 5.8. ábrán az A_4^{\sharp} hangra, nyolcadfokú mindentáteresztő alkalmazásával.

Valamivel többet várhatunk általános mindentáteresztő szűrőtervező algoritmusok alkalmazásával. *Roccescho* és *Scalon* három különböző szűrőtervezési módszert hasonlított össze a zongora diszperziója által előírt célfüggvény figyelembevételével [Rocchescho96]. Az általuk vizsgált módszerek közül egy iteratív eljárás bizonyult legjobbnak. A *Lang* és *Laakso* által kidolgozott módszer a célfüggvény transzformációja után egy lineáris egyenletrendszerre vezet. A négyzetes egyenlethiba minimalizálása ennek a lineáris egyenletrendszernek a megoldásával történik. Az egyenlethiba minimuma azonban nem egyezik meg a fázishiba minimumával, mert az a módszer elvéből következően a nevező átviteli függvényének megfelelően súlyozódik. Ennek inverzével súlyozva azonban (iteratív lépésekkel) a fázishibát is minimalizálhatjuk [Lang94]. Mivel jelen esetben a fáziskésleltetés hibáját kell minimalizálnunk, ezt a súlyozófüggvényt még a frekvencia négyzetével osztanunk kell. A módszer előnye, hogy implementációja viszonylag egyszerű, de csak egyenletesen elosztott frekvenciapontok és alacsony fokszám ($N < 10$) esetén ad biztosan stabil eredményt. A zongora mélyebb hangjainál szükséges nagyobb fokszámú ($N = 20$) szűrő tervezésénél *Roccescho* és *Scalon* az előírt késleltetés több kisebb fokszámú szűrőre történő



5.8. ábra.

A waveguide előírt, valamint a diszperziós szűrő által megvalósított effektív hossza felosztását ajánlja. Az algoritmus implementációja a közeljövőben hamarosan megtörténik.

5.2.5. A törtrészkésleltető

A veszteségi és a diszperziós szűrő megtervezése után a hang pontos alapfrekvenciáját a waveguide hosszának beállításával és egy kiegészítő törtrészkésleltető hozzáadásával állítjuk be. A veszteségi és a diszperziós szűrő fáziskésleltetését (D_{gk} , $D_{má}$) kiszámolva a szükséges késleltetés:

$$D_{wg} + D_{tk}(f_0) = D(f_0) = \frac{f_s}{f_0} - D_{gk}(f_0) - D_{má}(f_0) \quad (5.5)$$

Ahol D egészrészét a waveguide-al (D_{wg}), törtrészét pedig elsőfokú mindentá-teresztő segítségével (D_{tk}) állítjuk elő. Ily módon a hang alapfrekvenciáját nagyon pontosan beállíthatjuk, és zenei szempontból ez a legfontosabb jelentőségű. A felsőbb harmonikusok esetleges kisebb-nagyobb eltérése ugyanis csak a diszperzió jellegét változtatja, pontatlan alapfrekvencia viszont hamis hangot eredményez.

5.3. A sugárzó modellezése

A húr által átadott rezgési energia hallható hanggá alakításáért a sugárzó (a zongora esetében a rezonátorlemez) a felelős. Ez egy időinvariáns szűrőnek tekinthető, amelynek átviteli függvénye azonban a megfigyelési pozíció (mikrofon) függvényében jelentősen változik. Az *iránykarakterisztika* hatását jelen dolgozatunkban figyelmen kívül hagyjuk, azaz a rezonátort egy egyszerű lineáris szűrőnek tekintjük.

A térbeli sugárzási karakterisztika figyelembevétele esetén, a rezonátorlemez pontos modelljére van szükség a rezonátorlemez elemeire bontásával és a differenciálegyenlet lépésenkénti megoldásával vagy kétdimenziós waveguide alkalmazásával), ami a számításigény nagymértékű növekedéséhez vezet.

Modellünkben nem vesszük figyelembe az egyes mérési pontokban (az egyes húroknál) kapott átviteli függvények eltéréseit, hanem egyetlen közös átviteli függvénnyel számolunk. Ez azzal a gyakorlati előnnyel jár, hogy az egyes hurok kimeneti jelét összeadva, azokat közösen szűrve csak egyetlen szűrő megvalósítására van szükség.

Ahogy a zongora analízisének a 4.7. ábrán láthattuk, a rezonátorlemez erő-hangnyomás átviteli görbéje nem az egyszerűen identifikálható függvények családjába tartozik. Bár a kalapácsütésre adott válaszok tipikusan 300–400 ms hosszúak voltak, a feldolgozás egyszerűsítése érdekében a jel első 100 ms-át vettük figyelembe. A spektrum kiszámításakor többféle ablakfüggvénnyel próbálkoztunk, a legjobbnak a *négyszög-* és a *Hanning ablak* kombinációját találtuk. Mivel a jel tranziens jellegű, a rekord első 4/5 részén nem történik súlyozás, a végén azonban a jelet egy Hanning-ablak jobboldali felével szoroztuk meg. Próbálkoztunk a tranziens jelek vizsgálatánál gyakran alkalmazott *exponenciális* ablakfüggvénnyel is, ez azonban (érthető módon) a rezonanciák jóságát jelentősen lecsökkentette. A rezonátorlemez impulzusválaszát az átviteli függvényből *IDFT* segítségével határoztuk meg. Az így kapott eredmény azonban nem volt közvetlenül használható, mert a mérés magas zajszintje a dekonvolúciót pontatlanná tette. Ennek következtében, hogy az erőjel gyakorlatilag csak 5 kHz-ig tartalmazott használható komponenseket, az impulzusválasz ennél magasabb frekvenciákon rendkívül zajossá vált. A probléma megszüntetésére a spektrumot az *IDFT* előtt 5 kHz fölött egy, a frekvenciával fordítottan arányos taggal szoroztuk meg. Bár ez heurisztikus megoldás, az így kapott impulzusválasz a meghallgatások során zongoraszerű hangot produkált.

A modellünk későbbiekben történő valós időbeni implementációját azonban a jelenlegi, 2000 együtthatót tartalmazó *FIR* szűrő alkalmazása nagyban megnehezítené. A számítási igény csökkentése érdekében megpróbáltunk a mért átviteli függvényre nagy (50, 100) foksámú *IIR* szűrőt illeszteni. Sajnos eddig nem sikerült olyan algoritmust találni, amely erre képes lett volna. Ennek oka részben a méréseink zajosságában, részben pedig az átviteli függvény nagyszámú éles rezonanciáiban keresendő. A gitár esetében jól bevált a test alsó módusainak rezonátorok segítségével történő modellezése. Az impulzusválasz további részének modellezésére az alsó módus kiszűrése után már egy rövidebb *FIR* szűrő is alkalmas volt [Karjalainen99]. A zongora esetében ezen módszer is problémákba ütközhet, hiszen itt nem egy- vagy két domináns módus jelenlétéről van szó. Ennek ellenére, hogy a rezonátorlemez egy „egyszerű” lineáris szűrőnek tekinthető, modellezése jelentős problémákat vet fel. Az analízis során mindenesetre világossá vált, a sugárzó szimulációjához pontosabb mérésekre van szükség, ezért tervezzük a rezonátorlemez szinuszos vizsgálatát. A rezonátorlemez shakerrel történő szinuszos gerjesztésével ugyanis jobb jel/zaj viszonyt érhetünk el, hiszen a válasz vizsgálatokor sávszűrőt alkalmazva, továbbá a mérési időt kellően nagyra választva a zaj energiája nagymértékben csökkenthető.

5.4. Az alapmodell kiegészítései

Az imént felépített zongoramodell Matlab szimulációja már zongoraszerű hangot eredményez, de hang minősége még kívánnivalókat hagy maga után. Az ismertendő kiegészítések egy része már megvalósításra került, a *hangminőség/komplexitás* arány alapos vizsgálata azonban még mindenütt várat magára.

5.4.1. Több húr figyelembevétele

A zongora kettős, illetve hármas húrjainak szimulációja esetén a legegyszerűbb megoldás kettő vagy három, kissé elhangolt, egymástól független húr párhuzamos működtetése. Ez a hangzás minőségében már két húr esetében is jelentős javulást ad, bár a számítási komplexitás is megduplázódik. A húrok közötti csatolás figyelembevétele ehhez képest nem jelent jelentősen nagyobb számításigényt, így érdemes megpróbálkozni bevezetésével.

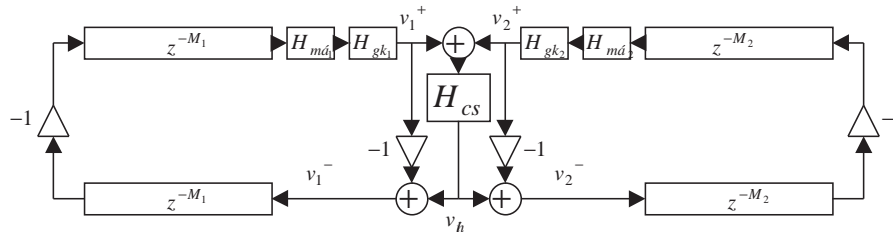
Könnyen alkalmazható módszernek tűnik *Smith* megoldása. A haladó- és visszavert hullámok felírásával először meghatározza a közös impedancia sebességét, majd a visszavert sebesség-hullámokat a híd és az adott húrhoz tartozó haladóhullám sebességének különbségeként nyeri (az ideális, csatolatlan waveguide ennek speciális esete, ha a híd sebessége nulla, a visszavert hullám a haladó hullám -1 -szerese lesz) [Smith93]. A híd mozgásának leírására szolgáló szűrő a lezáró impedancia és a húrok hullámimpedanciája alapján számolható, a lezáró impedanciát egyetlen húr lecsengési időadatai alapján határozza meg. Ilyenkor a gyakorlatban is megtörténik a diszperziós és a veszteségi szűrő szétválasztása, hiszen a diszperziós szűrő és a törtrészkesleltető az egyes húrok modelljében külön-külön megmarad, a veszteségi szűrő szerepét viszont egy közös *csatolászűrő* veszi át. Ezzel a módszerrel mi is megpróbálkoztunk, használható eredménnyel, érdemes lesz azonban az eljárást továbbfejleszteni. A módszer hibája, hogy míg egy húrnál minden további nélkül megtehető, hogy a veszteségeket a lezárásba koncentráljuk, több húr esetén nem ez a helyzet, hiszen az ezek után nem csak a lecsengési időket, hanem az egyes módusok csatolását is befolyásolja. A lecsengési időkből visszszámolt impedancia az alapharmonikus környékén a valóságoshoz közeli tartományban van (1000 kg/s körül), de pár harmonikussal feljebb érve rohamosan csökken, ez pedig a zongora impedanciagörbjét vizsgálva nem mondható el. Ennek eredményeképpen a magasabb harmonikusok nem csak egyszerűen hamarabb csengenek le, hanem azokon a frekvenciákon a csatolási tényező túlságosan magas értéket vesz fel, ezzel némileg természetellenes hangzást eredményezve. Ez utóbi tény ellenére – egyszerűsége miatt – jelenlegi modellünk is ezt a megoldást alkalmazza.

Igazi megoldásnak a húrveszteségek és az impedancia által okozott csatolás különválasztása ígérkezik. Erre két módszert ajánlunk. Az egyik a lecsengési időkből indul ki és feltételezi, hogy a húr veszteségei a lecsengési időt (5.1) szerint befolyásolják. Ilyenkor az adatokra először elsőfokú szűrőt illesztünk (a későbbiekben ezt használjuk veszteségi szűrőnek, lásd H_{gk} -t az 5.9. ábrán), a lezáró impedanciát figyelembe vevő csatolászűrőt (H_{cs}) pedig ezen szűrő átvitele alapján korrigált lecsengési idők szerint tervezünk. A fizikai képből következik, hogy a lezárás a lecsengési

időket csak csökkenteni tudja, ennek betartásához az elsőfokú szűrő által meghatározott lecsengési idő görbájének a kívánt lecsengési idők felett kell futnia. A szűrő ilyen értelmű szétválasztására még nem sikerült robusztus algoritmus találnunk, mivel a csatolt hurok stabilitásának kézbentartása nem egyszerű feladat. Az értékek manuális korrekciójával, és ezen „kézzel” módosított szűrők meghallgatása azonban biztató eredményt adott.

Egy másik lehetséges módszer a két hatás szétválasztására az impedanciamérés eredményein alapul, tulajdonképpen az előző fordítottja. Itt a mért impedancia alapján kiszámított és megtervezett csatolósűrő átvitelével korrigáljuk a specifikációt és ez alapján tervezzük meg a veszteségi szűrőt. Ezen módszer gyakorlati megvalósításával a rendelkezésre álló impedancia adatok pontatlansága miatt még nem foglalkoztunk.

A két megközelítés megvalósítása azonos alakot ölt, ennek blokkdiagramja látható az 5.9. ábrán (a Smith által javasolt módszer ennek speciális esete, ott $H_{gk} = 1$).



5.9. ábra. Két veszteséges húr közös lezáró impedancián

A két húr frekvenciájának egymáshoz képesti beállítását (széthangolását) egyelőre „fültre” végeztük, a szükséges széthangolás mértéke azonban a mérési eredmények alapján, a harmonikusok burkológörbájének lebegési frekvenciáiból is (a harmonikusok sorszámával osztva) könnyedén meghatározhatók.

5.4.2. A hiányzó polarizációk

A rezonátorlemezzel párhuzamos polarizáció pontos figyelembevételéhez húrunként egy további waveguide működtetésére van szükség. A zongora esetében ez utóbbi waveguide nem áll a kalapáccsal kapcsolatban, hiszen a kalapács (ideális esetben) csak a rezonátorlemezre merőleges polarizációt gerjeszti. A párhuzamos polarizáció tehát rezgési energiát csak a merőleges polarizációtól nyerhet. A zongorahang kettős lecsengését a párhuzamos polarizációért felelős waveguide lecsengési idejének a merőleges polarizáció waveguide-jánál hosszabbra állításával valósíthatjuk meg. Az egyes polarizációk csatolásának beállításakor itt is ügyelnünk kell a stabilitás kérdésére. A legegyszerűbb (bár a fizikával némileg ellentmondó) megoldás, ha csak egyirányú csatolást tételezünk fel, ez esetben az energia a merőleges polarizációtól a párhuzamos felé áramlik [Karjalainen98].

Mi a párhuzamos waveguide üzemeltetésénél egyszerűbb, ugyanakkor a hatást jól közelítő struktúrát javasolunk a kétütemű lecsengés modellezésére. A kettős le-

csengésnek elsősorban az alsó harmonikusoknál van jelentősége, így pl. az első öt harmonikus szimulációjával már megfelelő eredményt érhetünk el. Erre a célra a waveguide analízisének bemutatott rezonátoros struktúrát használjuk, ahol a rezonátorok frekvenciáit pontosan a waveguide frekvenciáinak megfelelően állítjuk be. A waveguide paramétereit érdemes a kettős lecsengés második szakaszának megfelelően beállítani, az első szakasz alapján számolt lecsengési időket pedig a rezonátorkészlet együtthatóinál figyelembe venni, mert így a pontatlan approximáció szakasza jóval rövidebb lesz. Ha fordítva járunk el, a waveguide jele a rezonátorkészlet jelenél hamarabb cseng le, így hallhatóvá válik, hogy a rezonátorkészlet csak az első pár harmonikust szimulálja. Ahhoz, hogy a két struktúra jele azonos fázisban legyen, a rezonátorstruktúrán kívül egy késleltetősor megvalósítása is szükséges (lásd a (3.11) képletet).

A longitudinális hullámok modellezésére ugyanezen megfontolások érvényesek, nyitott kérdés azonban, hogy hogyan lehet figyelembe venni a húron a megnyúlás következtében fellépő feszítőerő-változás longitudinális hullámot generáló hatását. Mivel a longitudinális hullámok a zongora hangjában mindenképpen negatívumnak tekintendők, ezzel a kérdéssel a továbbiakban nem foglalkoztunk.

5.4.3. A húr nemlinearitása

Érdekessége miatt érdemes megemlíteni a húr feszültségváltozásának figyelembevételének egy lehetséges módszerét. A húr megnyúlása az ívhosszintegrál diszkrét változatával számolható, amely a gyökvonás Taylor-sorba fejtésével tovább egyszerűsíthető. Az így kapott érték meghatározza a waveguide pillanatnyi alapfrekvenciáját és pillanatnyi hosszát (ezt egy változtatható törtrészkesleltetővel állítjuk be) [Välimäki99]. A waveguide késleltetésének ilyen értelmű változtatásával tulajdonképpen a 4.2.4. fejezetben tárgyalt nemlineáris hatást valósítja meg, ezek közül is azt, amikor a húr egy egyszerű, de nem ideálisan merev impedanciához kapcsolódik. Jelen dolgozat szerzői javasolják annak figyelembevételét is, hogy a húr a híd két oldalán szöget zár be egymással. Ilyenkor a hídra lefelé ható erőt csak az erőváltozás és a szög szinuszával arányos erőkomponenssel kellene módosítani, és ez egyszerűsége ellenére a modell élethűségét megnövelné.

5.4.4. Hangtompító

A hangtompító a billentyű felengedésekor a hang elnémításáért felelős. Hatásának figyelembevétele a kalapácshoz hasonlóan tehető meg, itt azonban a tömegpont-rugó modellt egy csillapítóval kell kiegészíteni. A modell megalkotásánál nagyobb problémát jelent a paraméterek beállítása, mivel a tompító kérdésével az irodalom mindezidáig nem foglalkozott.

5.4.5. Pedálok

A zongora pedáljai közül a legfontosabb a *zengetőpedál* megvalósítása, de egyben legbonyolultabb is, hiszen annak lenyomásával a rezonátor impulzusválasza 10-20

s hosszúságúra nyúlik. Ebből következően ennek ténylegesen „fizikai” modellezése egyelőre nem megoldható, itt a jel analíziséből kell kiindulni. Mivel mért impulzusválasz jellege nagyon hasonló a teremzengetést előállító algoritmusok impulzusválaszához, kiindulópontot ez utóbbiak alapkonceptiója jelenthet.

A zongora *una corda* pedáljának modellünkben történő megvalósítása viszont rendkívül egyszerű, ebben az esetben a kalapácsmodell csak az egyik húrhoz kapcsolódik (a másik húrra ható erőt egyszerűen konstans 0-ra állítjuk). A nem megütött húr ily módon a csatolás útján kap energiát. Az *una corda* pedál egy szép példája annak, mekkora előnyökkel járhat a modell fizikai jellege, hiszen ez más módszerekkel sokkal erőforrásigényesebb megvalósítást igényelne (pl. a PCM szintézis esetén kétszeres mennyiségű minta tárolását tenné szükségessé).

5.4.6. Véletlen hatások

Egy valóságos hangszer sohasem szólal meg kétszer azonos módon, ez adja a hangszer „élő” jellegét. Jelen fizikai modellünk ugyan más-más kalapácssebességekre más és más hangszínnel reagál, ez azonban (MIDI-n keresztül történő vezérlést feltételezve) a variációkat 127 esetre korlátozza. A hangzást érdekesebbé tehetjük, ha a modellünk bizonyos paramétereit véletlenszerűen elhangoljuk. Ezek közül a kalapács paramétereinek változtatása fizikai jelentéssel is bír, hiszen egyenletlensége miatt az egyes húrokat másképpen gerjeszti, továbbá az előző ütésből visszatérve, kissé elmozdulva a következő ütésnél már más paraméterek szerint fog viselkedni. Ilyen állítható paraméterek lehetnek p , K (lásd (4.2)) és a húr és a kalapács távolságát is változtathatjuk. A véletlen elhangolás mértékének beállítása próbálgatás, illetve mérési statisztika alapján történhet. A véletlent a teljes zongoramodell összeállításakor is segítségül hívhatjuk. Mivel a zongora összes hangjának mérése nehezen megoldható, a nem mért hangoknál a paraméterek interpolációjára van szükség. Ezen értékek (pl. a húrok széthangolása) interpoláció után egy kis véletlen számmal történő módosítása jobb modellt eredményez.

5.4.7. Az ideális zongoramodell

A zongora hangzásának kialakulásában nemcsak az azonos, hanem a különböző húrok közötti csatolás is szerepet kap. Különösen igaz ez az olyan egyszerre leütött hangokra, melyek egyszerű harmonikus viszonyban állnak egymással (pl. oktáv, kvint). A zenetópedál lenyomásával pedig a helyzet tovább bonyolódik, hiszen ez az összes húr csatolásával jár. Ezeket a hatásokat csak egy olyan zongoramodell tudná pontosan figyelembe venni, amely a zongora összes húrját párhuzamosan működteti, attól függetlenül, hogy az adott hang le van ütve, vagy sem. Az egyes húrok közötti frekvenciafüggő csatolási tényezők egy mátrixot alkotnak, amelynek az elemei szerencsére a passzív rendszerek tulajdonságaiból következően nagymértékben összefüggők. Ezen megoldás alkalmazásával olyan hatásokat is figyelembe lehetne venni, amelyekre eddig egyetlen módszer sem volt alkalmas. Bár ez még álom csupán, de ha a számítógépek megtartják jelenlegi fejlődési ütemüket, 10 éven belül valósággá válhat.

5.5. Összefoglalás

Érdeemes modellünk legfontosabb elemeit áttekinteni és azokat a megfelelő elvi kategóriákba helyezni. A szintézis élethűségében kiemelt szerepet játszik a *kalapács* megvalósítása. Ez a modellünk egyetlen *tisztán fizikai* része, hiszen az implementáció a kalapács mozgását leíró differenciálegyenlet diszkrét idejű megoldásával történik. A kalapács *nemlineáris* viselkedésének figyelembevétele a spektrum dinamikafüggő változását is biztosítja. Hatalmas előny, hogy a zongora adott billentyűhöz tartozó bemenő paramétere, a leütési sebesség a modell egyetlen paraméterével (kalapácssebesség) közvetlenül leírható. Más módszerek alkalmazása esetén a leütési sebesség változása jóval több paraméter változtatását teszi szükségessé, és azok a paraméterek a leütési sebesség nemlineáris függvényei. A fizikai modellezés esetén nincs szükség ezen nemlineáris függvények megkeresésére, a harmónikusok automatikusan a helyes módon viselkednek (ezen függvények elvileg megtalálhatók, de a zongora minden egyes hangjának pl. 100 különböző dinamikai szinten történő analízise értelmetlenül sok munkát követelne).

A *húr modellje*, bár valamivel távolabb áll a fizikai képtől, hiszen veszteségeit és a diszperziót egy pontba koncentráltuk, jó pár fizikailag interpretálható tulajdonsággal rendelkezik. Azon módusok, melyeknek a kalapácsütés helyén csomópontja van, a valóságnak megfelelően itt is hiányozni fognak a spektrumból. Szintén a waveguide modell elvéből következik, hogy a húr helyzetét gyakorlatilag a húr összes pontjában ismerjük. Ez a fizikai kalapácsmodell működtetéséhez elengedhetetlen, a húr kitérése jelenti a visszacsatolást a kalapács felé. A húr veszteségeinek és diszperziójának koncentrálása már nem tartozik ezen tulajdonságok közé, ám számítástechnikailag nagyon hatékony, és a szintézis szempontjából minden hátrány nélkül megtehető (hiszen ilyenkor a rendszerünket két pont között vizsgáljuk). A waveguide ily módon *hidat képez* a fizikai és az általános jelmodell között.

A *rezonátorlemez* szimulációja már az *általános lineáris rendszerek* leírásán alapul, a fizikai interpretáció itt teljes mértékben hiányzik. Ezzel elveszítjük azt a rugalmasságot, hogy a rezonátorlemez által keltett hangnyomást bármely pontban ismerjük, a számítási komplexitás tekintetében azonban ennél sokkal jelentősebb nyereségre teszünk szert. Mivel a rezonátorlemez paraméterei a játék során változatlanok és a viselkedése a különböző hangokra nézve nem mutat jelentős eltérést, nem követünk el nagy hibát, ha lineáris szűrővel modellezzük.

A fejezet tanulsága, hogy csak ott érdemes számításigényes fizikai modellt használni, ahol az feltétlenül szükséges. Ha megoldható és nem jár minőségromlással, akkor inkább a már kiforrott technikákat (pl. lineáris szűrés) célszerű alkalmazni. A *hatékony szintézis* megvalósításának lehetősége tehát a *különböző megközelítések megfelelő kombinációjában* rejlik.

6. fejezet

A hegedű

A hegedű a zongorával egyezően a húros hangszerek csoportjába sorolható ¹, ezen belül a vonósok családjába tartozik.

Az első húros hangszerek megjelenésének ideje nem meghatározható. A rezonátordobozzal rendelkező húros hangszerek kialakulása nagyjából 6000 évvel ezelőttre tehető. Az egyik legrégebbi régészeti lelet *Ur* városából való, egy 11 húrú, 1,1 m magas hárfa. Ennek származási ideje időszámításunk előtt 2400-2600. Ennél 600 évvel korábbi egy *Nippurban* talált vázakép, amely a pszaltérion² 5-7 húros ősét mutatja [Tarnóczy82].

A vonó használatára először kb. a 10. században került sor az arab-islám területeken és a Bizánci Birodalomban. Nyugat-európában ez az új eszköz a 11. századra váltotta fel elődjeit, a hosszú ütő- vagy dörzspálcákat. A lószőrözés és annak gyanútázása a 13. század óta bizonyítható. A vonó ma is használatos alakját *Fr. Tourte* szabványosította 1780 körül, de még egy fél évszázadba telt, míg Angliában és Németországban is érvényesült. Méretezésük és súlyuk csak kb. 1840-től egységes.

A hegedű korai, háromhúros formája (G_3 , D_4 , A_4 hangolásban) 1520 körül jött létre, a negyedik húrt (E_5) csak 1550 körül kapta. Elődeinek a *rebec* és a *lira da braccio* tekinthetők.

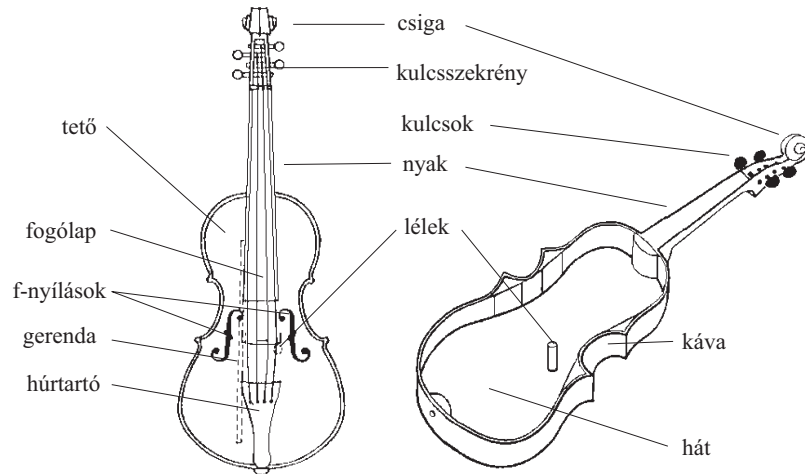
Alakja az évszázadok alatt nem sokat változott. Eleinte, mint azt a Bresciában működő hangszerkészítő, *Gasparo da Saló* (1540-1609) hegedűi mutatják, kevésbé volt domború, teteje vastag, f-lyukai pedig párhuzamosak voltak. Klasszikus formája *Andrea Amati* iskolájában jött létre a 16. század utolsó évtizedeiben. A forma tökéletesítője *Antonio Stradivari* lett, akinek 1713-as modellje megegyezik a ma is használt méretekkel (testhossz 355 mm).

Nem változott a test, a csiga és a kulcsszekevény formája, a menzúra és a húrok feszítettsége azonban kb. 1800 óta módosultak, hogy a koncerthangszeri igényeket (elsősorban hangerő) kielégítsék. A hangolás emelkedett, a fogólap és a nyak meg-

¹A csoportosítás indiai zenetudományi eredményekre támaszkodik, amelyet a belga Victor Mahillon vett át 1878-ban. E szerint a hangszerek négy alapcsoportba sorolhatók: *kordofon* (húros), *aerofon* (fúvós), *membranofon* (hártyás) és *autofon* (ütéssel megszólaltatott). Utóbbinak Erich von Hornbostel osztrák zenetudós javaslatára 1914 óta *idiofon* az elnevezése.

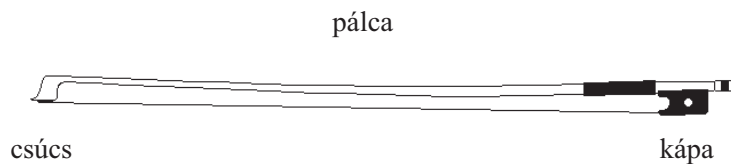
²Keret- vagy laposcitera, melynek húrjait csak ujjal vagy pengetővel pendítik meg. A cimbalom elődjének tekinthető.

hosszabbodtak (ez a magasabb fekvésbeli játékot könnyítette), a láb domború és magasabb lett, a nyak hátrébb dőlt, a fogólap a láb felé kiszélesedett és erősebb domborulatot kapott. Erősebb gerendát kívánt a húrok megnövekedett nyomóereje is. Az új követelményeknek megfelelően szinte valamennyi régi hegedűt átépítették.



6.1. ábra. A hegedű felépítése

A hegedű felépítését a 6.1. ábra szemlélteti. A hangszer teste, azaz a rezonátordoboz a *tetőből*, a *hátból* és a *kávából* áll. A tetőt és hátat a *lélek* köti össze, a *gerenda* a tetőt merevíti. Az *f-nyílások* a tetőn, a test középvonalára szimmetrikusan helyezkednek el. A *nyak* végén a *kulcsszekrény*, a *hangolókulcsok* és a *csiga* található. A *fogólap* a nyakra van ragasztva, a *húrtartót* a *csapszegre* kötéssel rögzítik. Az *f-nyílások* középvonalához és a lélekhez közel áll a *láb*. Ennek neve az angol terminológia alapján *híd* lenne, de nem ez terjedt el. Fémhúrozás esetén a húrtartón *finomhangolók* is vannak.



6.2. ábra. A vonó részei

A vonó részei a 6.2. ábrán láthatók. A vonó *pálcájának* egyik vége a *csúcs*, másik a *kápa*, itt helyezkedik el a *vonószőr* feszességének szabályozhatóságáért felelős egység.

Vizsgálataink céljából a hegedű is funkcionális egységekre osztható. Az első egység, a *gerjesztés* nem más, mint a vonás, ami a húrt kitérésre kényszeríti. A gerjesztés hatására a húrban rezgés alakul ki, a második résznek ezért a húrt tekinthetjük (és *rezonátornak* nevezzük). A létrejött rezgés egyrészt csillapodik a húr veszteségei

miatt, másrészt a lábon keresztül átadódik a rezonátordoboznak, ami a mechanikai rezgést rezgő felületei révén hallható hanggá alakítja (impedanciaillesztést végez). A harmadik egység így tehát a *sugárzó*.

A következőkben a hegedűt e tagolás szerint tárgyaljuk.

6.1. A hegedűvonó és a vonás

6.1.1. A jó hegedűvonóval szembeni követelmények

A vonó a hangkeltésben jelentős szerepet tölt be, a folyamat kiindulási pontja. Rugalmasnak és könnyűnek kell lennie. A rugalmasság a Young-modulussal (E) van összefüggésben, ez mestervonóknál kb. $2.9 \cdot 10^4$ N/mm², míg a rosszabbaknál csak $1.9 \cdot 10^4$ N/mm². Ez azért is fontos, mert a vonószár transzverzális sajátrezgést is végez, ami a vonónyomás és a vonószőr feszítettségének ingadozását okozza. A jobb vonók anyagának sűrűsége 0.97 kg/dm³, a rosszabbaké ennél 0.1 kg/dm³-rel kevesebb. A legtöbb kellően rugalmas fa sűrűsége túl nagy, a kis tömeg megtartásához a pálcát túlságosan el kellene vékonyítani. A célnak megfelelő fának a *pernambuk* (fernambuk) bizonyult, tudatos alkalmazása a vonó szabványosítója, *Fr. Tourte* kísérleteinek köszönhető. A jó alapanyag azonban igen drága, mert mestervonó készítésére a gesztfának³ csak 2-5 %-a alkalmas.

A harmadik fontos tulajdonság a vonó súlypontja, aminek a kápához közel kell lennie, hogy a hüvelykujjra ható forgatónyomaték minél kisebb legyen.

Az előbbi feltétel miatt a vonószár vastagsága a csúcs felé fokozatosan csökken. Méretezésre *Vuillaume* adott egzakt formulát *F. Chanot* és *F. Savart* fizikusok segítségével [Pap94]:

$$R(x) = 2.57 \lg x - 3.11, \quad (6.1)$$

ahol $R(x)$ a vonószár sugara, x pedig a vonócsúcstól 175 mm-re levő fiktív pont. Ha a szár keresztmetszeti alakját módosítjuk, a vonó merevsége változik. A szár nyugalmi (nem feszített) állapotában két irányban ívelt, ezt gőz fölötti hajlítással érik el. Az egyik, a szőrözés felé kidomborodás, a szálakat terhelő, összesen kb. 60 N nagyságú feszítőerő létrehozásához kell. A másik, az előzőre merőleges irányú görbület a játék közben fellépő oldalirányú kitérítő erőt hivatott ellensúlyozni.

A hegedűvonó tömege általában 55-65 gramm, hossza 75 cm.

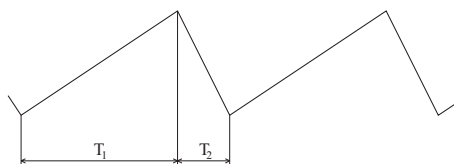
Szőrözésére a lovak farkát használják, 150-200 szál kerül a vonóra. A létrejövő hangot a vonószőr minősége jelentősen befolyásolja. A sötét szőr, tulajdonságai miatt, durvább hangzást eredményez, mint a világos, ezért előbbit inkább a népzeneben használják. Fontos a szőr egyenletes gyantázhatósága is az erős vonózaj elkerülése végett. A szálak felülete irányítottan pikkelyes, ezért a szálakat felváltott irányban kell a vonóra helyezni.

³A geszt a fa testének belső, sötétebb színű része

6.1.2. A vonás mint gerjesztés

A hegedű húrjait általában a vonóval hozzák rezgésbe vagy pengetik. Néhány esetben nem a vonó szőrével, hanem fájával (*con legno*)⁴, ez azonban ritka, így ezzel nem foglalkozunk. Nem foglalkozunk a pengetett hanggal (*pizzicato*) sem, hiszen a tipikus hegedűhang a vont, a pengetett inkább a gitárra jellemző.

A rezgéskeltési mechanizmus alapja a tapadási súrlódás. A tapadás növelése céljából a vonószőrt gyantázzák, ettől a szőrök jobban ragadnak, másrészt a kis pikkelyek felborzolódnak. A vonós családon belül a hegedű húrjai a legvékonyabbak, a legkevésbé feszítettek, így ezek kitéréséhez szükséges a legkisebb erő. Mélyebb hangú hangszereknél a húrok vastagodnak, ezért a szükséges vonóerő is nagyobb, ezekhez erősebb és merevebb vonóra van szükség. A játékbeli finomságok is főleg a hegedűnél számítanak, nem meglepő tehát, hogy a vonókészítés a hegedűvonó esetében a legproblémásabb, sok tapasztalatot igényel. Különböznek a gyanták is: a bögőhöz való sokkal lágyabb, ezért jobban tapad, a hegedűhöz való pedig keményebb, a két véglet között több fokozat található.



6.3. ábra. A vonó által létrehozott gerjesztés alakja

A húrra merőlegesen mozgó vonó a tapadási súrlódás miatt a húr magával ragadja, kitéríti. Ez a *megragadási szakasz*. A kitérés növekedtével a húrban ébredő rugalmas visszatérítő erő is folyamatosan nő, egészen addig, amíg nagysága el nem éri a tapadási erő értékét. Ekkor a húr visszalendül, ez az *elengedési szakasz*. A húr csillapított rezgésbe kezd. Saját veszteségein kívül csillapítja még a közte és a vonószőr között fellépő csúszó súrlódás (*visszatérési súrlódás*) is. Ez az állapot egészen addig tart, amíg a vonó ismét magával nem ragadja a húr. Ez akkor történhet, amikor a vonó és a húr mozgásának iránya és sebessége megegyezik. Ilyenkor ugyanis egymáshoz viszonyított sebességük nulla, a súrlódási erő maximális. A folyamat újrakezdődik. A gerjesztés tehát periodikus, állandósult állapotú, fűrészfog alakú rezgést kelt (6.3. ábra), az energia pótlása folyamatos. A hosszabb, lankásabb (T_1) a megragadási, a rövidebb, meredekebb (T_2) az elengedési szakasz. Egy teljes periódus alatt a kimozdulás hatása pontosan egyszer szalad végig a húron.

A vonás esetében a legfontosabb variációs lehetőségeket adó három, mindig megemlített paraméter a vonó sebessége, a húrra gyakorolt nyomása és a vonás helye. Fontos még, bár erről legtöbbször megfeledkeznek, a vonó húrral bezárt szöge is. Ezen kívül számít a vonáskor a húr érő vonófelület és a gyantázás minősége, ami, mint azt már említettük, a vonózajért felelős.

⁴Például Bartók *Fából faragott királyfi* c. művében

A vonó sebességének növelésével a húr kitérése megnő. Ez egyszerűen belátható, hiszen a rendelkezésre álló idő (amíg a kimozdulás végig nem ér a húron) nem változik, ha a sebesség nagyobb, nagyobb a megtett út is ($s = vt$). A rezgés amplitúdója, így a keletkezett hang intenzitása tehát a vonósebességgel egyenesen arányos. Túl lassú vonóhúzás esetén a súrlódási veszteség relatív megnövekedése miatt a rezgés le is állhat, vagy, ha az újbóli megtapadás rossz fázisban következik be, az alaphang második felhangja (*duódecimája*) gerjesztődik, ami sípoló hangként jelentkezik. Túl nagy sebesség esetén a hangképzés zaja nő meg. A megfelelő sebesség 10 cm/s és 150 cm/s közötti tartományba esik. Ez dinamikában 23.5 dB átfogást jelent.

A vonónyomás a vonó húrra merőleges erőösszetevője. Minimális vonónyomásra azért van szükség, hogy a húr veszteségeit és az egyéb veszteségek hatását csökkenthessük, a rezgés fennmaradjon. Emiatt és a minimális vonósebességnél elmondottak miatt a *pianissimo* játék nem lehet akármilyen halk. A vonónyomás növelésével a hangintenzitás nem változik [Cremer84], ennek ellenére mégis így érezzük, mert a vonóerő a felhangok intenzitását változtatja: az alacsony frekvenciájúakat elnyomja, a magasabbakat kiemeli, az emberi fül pedig a magasabb hangokat hangosabbnak ítéli meg. A hangterjedés során a magas hangok jobban csillapodnak, így a játéktól távolabb a közönség csak a hangszín változását érzékeli. A vonóerő a 0.03 – 0.3 N intervallumban mozoghat. A felső határnál a vonóerő a húr visszatérését csillapítja, ezáltal az állandósult rezgésállapot kialakulását akadályozza. A vonóerő nem jelenti azt, hogy a vonót nyomni kellene a húrra, a kar természetes súlya kellő nyomást biztosít.

A harmadik paraméter, a vonás helye, a hangintenzitást és a hangszínt is befolyásolja. A lábhoz közelebb gerjesztve nagyobb amplitúdójú rezgés alakul ki, mint a fogólapnál vonva. A vonás helyén a húr rezgésében nem lehet csomópont, így azok a felhangok, amelyeknek a gerjesztési pontban, vagy annak környezetében csomópontja lenne, egyáltalán nem, vagy csak kis intenzitással jönnek létre. Általában a lábhoz közel (*sul ponticello*) az erős, felhangdús hangokat, a fogólap alsó vége fölött (*sul tasto*) a gyöngye, tompább hangzásúakat. A vonás helyének két szélső helyzete között azonos vonósebesség mellett 12,5 dB intenzitásszint különbség fogható át. Alapesetben a vonót a húr 1/5 és 1/25 részei között húzzuk.

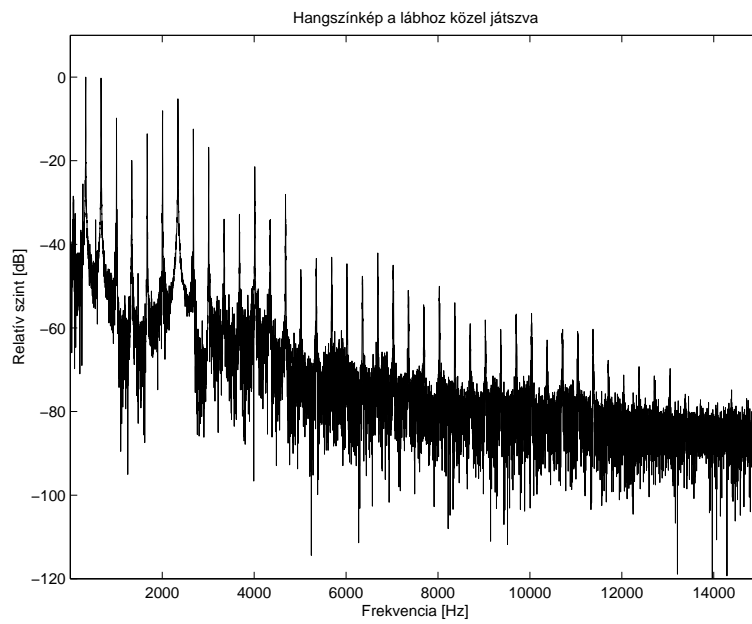
Egy d-húron lefogott *E* hang *sul tasto* és *sul ponticello* megszólaltatásának felvétel alapján készített hangszínképe látható a 6.4. és 6.5. ábrákon. A felhangok amplitúdóinak különbségei jól megfigyelhetők a két játékmód között.

A fentiekből következik az is, hogy a vonó húrral érintkező felületének nagysága szintén a kialakuló hangszínért felelős, minél nagyobb, annál több felhang kialakulását gátolja.

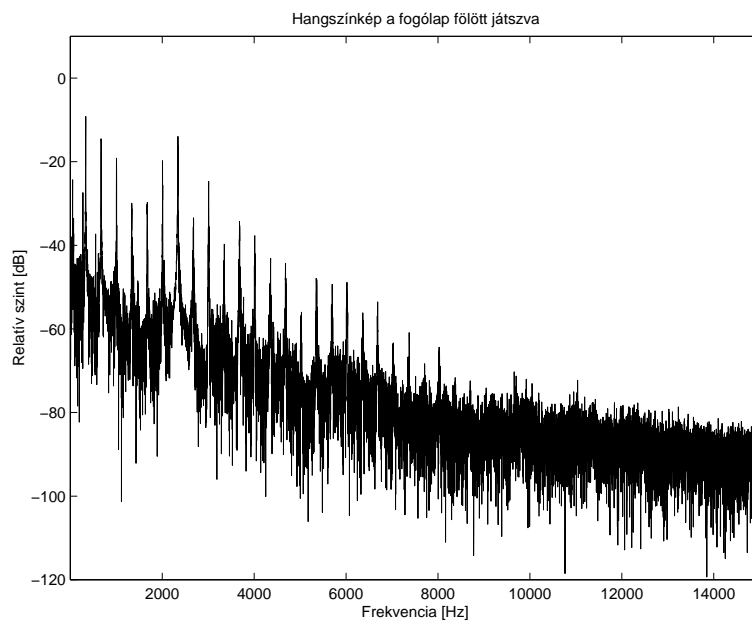
A vonás helyétől a vonóerő minimális és maximális értéke is függ, az összefüggést szemlélteti a 6.6. ábra (J. C. Schelleng, 1973 [Tarnóczy82]).

Az ábrán az alsó vastag vonal a minimális, a felső a maximális vonóerőt mutatja, a vonás helyének függvényében. Hangkeltésre a két görbe közötti tartományban van lehetőség. A sáv fölött a hang nem szép, alatta bizonytalanná válik. A lábhoz közel a vonóerő beállítása kényes feladat, a fogólapnál könnyebben megtehető.

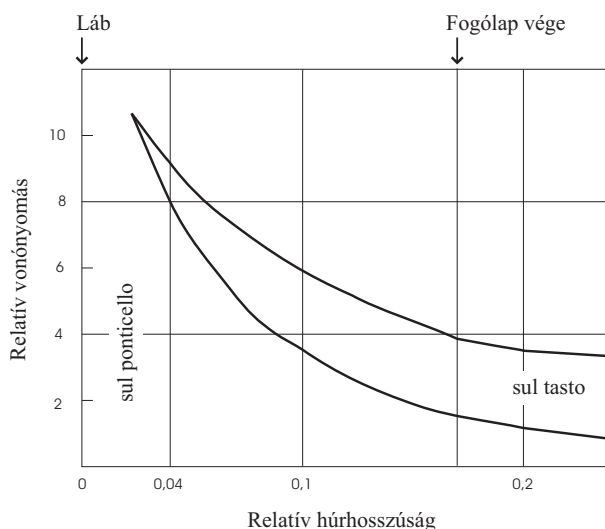
A vonó húrral bezárt szöge legtöbbször derékszög, de ettől eltérő is lehet. Függvé-



6.4. ábra. Vonás a húrlábnál



6.5. ábra. Vonás a fogólap fölött



6.6. ábra. A vonóerő értéke a vonás helyének függvényében

nyében a hangszín változik, valószínűleg a nem merőleges kitérés miatt a merőleges esethez képest torzul a felhangtartalom. Az irodalomban ([Pap94], [Tarnóczy82], [Cremer84]) erre vonatkozó megfigyelés nem található.

6.2. A húr rezgése, hangkeltés

6.2.1. A húr és rezgése

A *Mersenne-féle törvények* kimondják, hogy ideális húr esetében, a húr rezgésének frekvenciája egyenesen arányos a feszítettség négyzetgyökével, fordítottan az azonos tulajdonságú húr hosszával, vastagságával és (ebből következően) az egységnyi húrhosszúságra eső tömeggel. A létrejövő alaprezgés hullámhossza (λ) és a húr hossza (l) közötti kapcsolat a következő:

$$l = \frac{\lambda}{2} \quad (6.2)$$

Adott hosszúság mellett a húr hangolása nem oldható meg kizárólag a húr feszítésével, ezért a hegedűnél különböző vastagságú húrokat alkalmaznak. Ha a vastagság csökkentésével nem érhető el a kívánt hangmagasság, a húr feszítettségét kell növelni, míg mély hangok húrjainak esetében, ha a vastagság tovább már nem növelhető, a megoldást a húrok tömegének megnövelése adja. Ez a húr nagy sűrűségű fémhuzallal történő körbecsavarásával történik.

A vonós gerjesztés hatására a húr felhangjai is gerjesztődnek, ezekre:

$$l = n \frac{\lambda}{2} \quad (6.3)$$

A húr minősége természetesen befolyásolja a hangszínt. A hegedűnél alkalmazott ezüstszállal befont bélhúrnak nagyon szép hangja van, míg a fele akkora fajsúlyú

alumínium húr a 11. és 18. felhang között erősen kiemel, ezért hangja durvább. Szokásos még más fémbevonatú húr, fémhúr és fémezés nélküli bélhúr alkalmazása is.

Ha a húr nem tekinthető ideálisnak, mert túl merev, diszperzió, azaz a rezgés felhangjainak eltolódása léphet fel. A diszperzió jelenlétét az adott hegedű és hürkészlet esetében mérésekkel vizsgáltuk. Ezek során mindegyik húron több hangról készítettünk hangfelvételt, majd kiszámítottuk ezek FFT-jét (gyors Fourier-transzformációját). A húr szabad, rezgő részének hossza minden hang esetében változott, így a nagyon rövid (ezért feszesebb) rezgőhosszú eseteket sem hagytuk figyelmen kívül. Diszperzió nem volt tapasztalható.

6.2.2. Vont húr rezgése

A vont húr rezgése nagyon bonyolult fizikai jelenség. Lothar Cremer könyvében ([Cremer84]) 200 oldalt szentelt a probléma leírására.

A húr a 6.1.2. részben leírt, tapadási és csúszó súrlódáson alapuló gerjsztés hatására fűrészfog-szerű rezgést végez. Ha a húr és a vonó között nem lenne csúszó súrlódás, a húr rezgése szimmetrikus lenne, így azonban a vonás irányában jobban kileng. Az aszimetriából adódóan az egyensúlyi helyzete is eltolódik, ami energia tárolását jelenti. Ezt vonásirányváltáskor hasznosítja, amikor nem hat rá húzóerő, ezért lehetséges a törésmentes hangzású vonásváltás.

A húr rezgése veszteséges. Energiájának elenyésző részét sugározza hangként (nem nagyon hallható), ezen kívül a következő veszteségek vannak: belső súrlódás, visszatérési súrlódás, az ujjbegy puhasága és a vibrato miatti veszteségek, valamint a láb által közvetített, a test által elszívott energiahányad. Jelentős veszteség a visszatérési veszteség (vonóval való súrlódás vesztesége).

6.2.3. Hangkeltés

A hegedűn négy húr található, egymástól kvint hangközre, azaz a húrok frekvenciájának aránya $3 : 2$. A húrok hangolása: G_3, D_4, A_4, E_5 , ahol az A_4 a normál zenei „a” hang, frekvenciája 440 Hz.

A játékos, bal kezének ujjaival a húrokat különböző helyeken szoríthatja a fogólaphoz (foghatja le), így a húr rezgő részének hossza rövidül, a húr alaprezgésének frekvenciája megnő. Mivel a hegedűn nincsenek bundok mint a gitáron, a fizikai korlátokon belül (húr, fogólap hossza) tetszőleges magasságú hang lejátszható. Ez a zenei kifejezésben nagyfokú szabadságot, kezdők számára pedig sok bosszúságot jelent. A bundok hiánya lehetővé teszi az azonos húron lévő hangok közötti folytonos átmenetet, a *glissandot* is.

Ahhoz, hogy a hang megszólaljon, a vonóval meg kell húzni azt a húrt, amelyiken a lejátszandó hangot lefogatuk. A lefogás ugyanannál a hangnál több húron is történhet, hogy ezek közül a játékos melyiket választja, elsősorban az igényelt hangszíntől, másodsorban a lejátszhatóságtól függ. Alapfékvésben, amikor a balkéz legtávolabb van a testtől, egy húron csak kvint hangközön belüli hangok foghatók le. Ennek, és így a hangszínvariációk növelésének céljából is, a bal kezét el kellmozdítani az

alaphelyzetből, azaz fekvést kell váltani. A fekvések számozottak: első, második, ... kilencedik, stb. A szám azt adja meg, hogy a g-húron a C-dúr skála szerint lépegetve hányadik hang helyére esik a mutatóujjunk az új pozícióban. Az alapfekvés ebből következően az első fekvésnek felel meg.

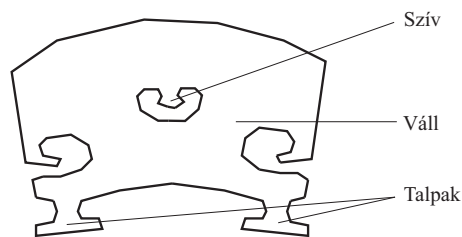
A minden moduláció, változtatás nélkül megszólaló hang nyers. Modulációt *vibratoval* hozhatunk létre, ekkor a hang „élőbbé” válik. A vibrato a fogólapon lévő ujjak kis mértékben történő döntögetésével érhető el és frekvenciaingadozást okoz.

6.3. A láb és a test

A húrok rezgése önmagában nem alkalmas jelentős hangnyomás létrehozására, mert kis felületük miatt a megmozgatott levegő mennyisége is kicsi. A mechanikai energia akusztikaivá alakítását (impedanciaillesztést) a test és a láb együttesen végzik. A húrok a lábon keresztül adják át rezgésüket a tetőlemezeknek, innen az a tetőt a háttal összekötő lelken jut el a hátlemezekhez. A két sugárzó felület rezgése már hallható hang létrejöttéhez is elég.

6.3.1. A láb

A láb a vázlatos rajza a 6.7. ábrán látható, a hagyományoknak megfelelően az fnyílások bevágásai pontjainál állítják fel. Részei a talpak, amivel a tetőn áll, a váll és a középső faragás a szív. Kialakulását nem pusztán esztétikai, hanem egyéb, kísérletkre támaszkodó indokok vezették. Mai alakja segíti az energiáttranszformációt, melynek során a húrok rezgését a testre merőlegessé alakítja át és mimializálja a test visszahatását a húrokra. A jó rezgésátadás érdekében a talpak a tetőhöz pontosan kell, hogy idomuljanak.



6.7. ábra. A húrláb részei

A lábat a négy húr összesen 90–100 N erővel terheli, magasságát ez és a játéktechnika határozza meg, kb. 35 mm. Tömege 2-3 gramm. A hangszerre erősítve egyik rezonanciafrekvenciája 2–2,5 kHz, ami hangszer nélkül ennél magasabb. Másik rezonanciája 400 Hz környékére esik. A sajátrezgések kimutathatók pl. holografikus eljárással (time-average holography). Először Reinicke alkalmazta ezt a vizsgálati módszert, aki mérési eredményei alapján megalkotta a láb mechanikai modelljét amely a láb hajlítás rezgését is visszaadja [Cremer84]. A sajátrezgéseinek hatása a hangban kimutatható: egy merev láb fényesebb, egy puha lágyabb hangot hoz létre.

Feladata az optimális energiafelhasználás megvalósítása. Annyi energiát kell kicSATolnia a húrból, hogy az elsugárzott teljesítmény a lehető legtöbb legyen, de emellett annyit meg is kell hagynia a húrnak, ami a vonó által pótoltt energiával együtt az állandósult állapot fenntartásához szükséges. Magasabb frekvenciákon egyébként a sugárzásban maga a láb résztvesz.

6.3.2. A sordino hatása

A lábra járulékos tömeg felhelyezésével a legjelentősebb, 2,5 kHz körüli rezonanciafrekvenciája egy oktávval is lejjebb tolódhat, míg a másik, mélyebb rezonanciafrekvencia 2 egészhang változást szenvedhet. Másik hatása a magasabb rezgések átadásának csökkentése. Ezáltal a test sugárzás is lecsökken. Ugyanez történik a *sordino* (hangfogó) felhelyezésekor is, aminek tömege mindig nagyobb a lábénál, tipikusan 3–6 gramm.

6.3.3. A test

A kialakuló hangszín és hangerő szempontjából a test a hegedű legkritikusabb része. Amíg a láb rezonanciafrekvenciája alakítással könnyen hangolható és minden probléma nélkül ki is cserélhető, az elkészült hegedűtest hangjának módosítása cseppet sem egyszerű feladat. Ha a lélek jól van beállítva, további változtatásokat csak a test feltárása után végezhetünk, ehhez a ragasztásokat kell megbontanunk.

A megfelelő faanyag kiválasztása nem triviális feladat. A tető anyagánál ügyelni kell az alacsony gyantatartalomra, mert az a rezgési tulajdonságokat rontja, ezért megfelelő a luc- és jegenyefenyő, ezekben a legkisebb ugyanis a gyantatartalom a fenyőfélék között [Pap94]. A tető, a lélek és a gerenda lucfenyőből, a hát, a káva, a nyak és a csiga jávorfából, a húrtartó és a fogólap pedig ébenfából készül. Általánosan elmondható, hogy vonós hangszerekhez a csomómentes, egyenes szálszerkezetű és egyenletes évgyűrűszerkezetű fák alkalmasak. Az évgyűrűszerkezetekre a tető kivágásánál is figyelni kell, hogy a sűrűbb évgyűrűk a *diszkantoldalra* (a magas húrok oldalára) kerüljenek (illetve a ritkábbak a basszusoldalra). Két darabból álló tető esetén a tengelyesen tükrös évgyűrűszerkezet az ideális, amikor a sűrű rész középre, a ritkább a szélek felé esik.

A fa makroszerkezete és a fizikai paramétereik közötti kapcsolat felderítése céljából *J. P. Beldie* végzett alapos elemzést, amelynek eredményei a következők voltak:

- a defektusok teljes hiánya,
- az évgyűrűk szélessége hegedű (és brácsa) estében $0,8 - 2,5$ mm, cselló, bőgő és gitár esetében ennél nagyobb,
- az évgyűrűszerkezet egyenletessége,
- a késői pászták (az évgyűrűben az őszi hónapok sávjai) aránya max. 25 %,
- egyenletes szálszerkezet.

Beldie-ék a csillapítást, a sűrűséget és a Young-modulust mérték. Azt találták, hogy jó sugárzási tulajdonságokhoz a széles évgyűrűszerkezet és a kicsi késői pászta arány vezet [Pap94].

A faanyag kezelésének és a kész hangszertest lakkozásának fontossága nem vitatott, azonban optimális eredményt adó eljárás nem ismert.

A test feladata a mechanikai rezgés kis veszteségű átalakítása akusztikai rezgéssé. A faanyag tulajdonságai mellett, a test kialakítása tölt be fontos szerepet, a ma is használatos hegedűforma évszázadok alatt, leginkább empirikus úton jött létre, ahogy azt a fejezet elején már röviden említettük.

A hangszín kialakulásának szempontjából a test egy szűrőnek tekinthető, ami a mechano-akusztikai átvittel jellemezhető. Jellegzetes rezonanciái több okból erednek. Az egyik ilyen ok a testbe mint akusztikai üregbe zárt levegő rezgési módusaiból fakad. Ezen rezgések alapmódusa a *léghang*, ami frekvenciában D_4 környékén jelentkezik. A rezonanciák további három csoportját a domináns rezgést adó felület alapján alkotják, így beszélhetünk *korpuszrezgésekről* (ekkor a tető és a hát hasonlóképpen mozog), valamint *tető-* és *emphátmódusokról*. Az első legerősebb testrezgés a *fahang*, ami A_4 környékén adódik.

A sugárzásban ezek közül nem mindegyik módus vesz aktívan részt. Ebből a szempontból fontos módusok a léghang, a tető alapmódusa, és a bezárt levegő 3. és 4. módusai. A módusok kimutatására korszerű módszer a holografikus interferencia, elemzésükre pedig a végelelemmódszerek (FEM).

A mechano-akusztikai átviteli függvény mérésére több kísérletsorozat történt, ezeknek eredményeképpen elmondható, hogy a meterhangszerekre három fő rezonancia jellemző: 300 Hz alatt, 430 Hz körül, valamint 500 Hz-felett. A régi, olasz hangszereknél 2 – 2,5 kHz-es kiemelés (*énekesformáns*), a mesterhangszereknél erős diszkant tartomány (1 – 4 kHz között), a gyári hegedűknél gyengébb diszkant tartomány tapasztalható. Az erős diszkant hangoktól a hangszín fényesebb lesz.

6.4. Mitől hegedű a hegedű

A zongorával szemben a hegedűnél a reflexiók szűrő tervezése egyszerűbb feladat, hiszen a húrok száma csak négy, valamint ahogy azt kimutattuk, a diszperziót sem kell modelleznünk. A hangok közötti folytonos frekvenciaátmenet biztosítása viszont más megvalósítási problémákat vet fel.

A játék szempontjából a hegedűnél sokkal több lehetőség van zenei árnyalatok kifejezésére, amelyek modellezése elengedhetetlen valóságghű hegedűhang szintéziséhez.

7. fejezet

A hegedűhang szintézise

A hegedűhang fizikai modell alapú szintéziséhez teljesen más irányból kell közelíteni, mint a zongora esetében. Ennek több oka is van, amelyek részint a hangszerek felépítésembeli különbségéből, részint a játéktechnikából fakadnak. A korábban ismertetett hármas felosztás azonban ennek ellenére megtartható.

A jóminőségű szintézist egy mindenre kiterjedő, alapos analízisnek kell megelőznie, amelynek során megismerhetjük az egyes funkcionális egységek szerepét, a hang kialakulásának szempontjából lényeges hatásait. Az egységek szerepét az előző fejezetben részletesen tárgyaltuk.

A leírtak ellenére vizsgálatainkkal először mégis a hangszer hangját elemeztük, csak ezután került sor a hegedű fizikájának megismerésére.

7.1. Jelmodell alapú szintézis

Ahogy az a 2.1.3 szakaszban leírtuk, egy hangszer hangja kielégítően modellezhető az additív szintézis egy továbbfejlesztett változatával. Ahhoz, hogy a szintézis működjön, a hangszer hangjának időben három elkülönülő részre oszthatónak kell lennie: berezgés, tartás és lecsengés, tehát szükséges állandósult állapot létrejötte is. A módszer korlátai részben ennek köszönhetőek.

7.1.1. A modell egyszerűsítése és ennek hatásai

A hegedű hangja a kívánt három részre osztható, ha a következő jelentős egyszerűsítésekkel élünk:

- A hangkeltés során nincs *vibrato* (1)
- A hang magassága nem változik, azaz a „virtuális játékos” rögtön eltalálja a kívánt hangot, valamint nincs *glissando* sem (azaz a két egymást követő hang közötti váltás nem az ujj csúsztatásával, hanem *billentéssel* történik) (2)
- A játszható hangok számát korlátozzuk, megelégedve az oktáv 12 félhangra osztásával (3)

- Diszkrétizáljuk az összes egyéb játékparamétert (vonó sebessége, vonás helye, vonónyomás, vonásnemek, stb.) (4)
- Egyértelmű leképezést létesítünk a hangmagasság és a megszólaltatásánál alkalmazott húrlefogás helye között (5)

A hegedűn játszó művész nem gép, hanem ember. Játékában ezért jelentős szerepet tölt be a bizonytalanság. Még a gyakorlott hegedűs sem találja el mindig a hang pontos helyét, a hang kicsit alacsony vagy magas lesz. Ez játék közben kellő gyorsasággal korrigálható, azonban ha az eltérés nagyon kicsi, nem észrevehető, a javítás gondolata fel sem merül. Kevésbé tapasztalt játékosok bal kezük tévedését vibratoval leplezik. Koncertező szőlóművészek néha szándékosan magasabban játszanak (magasan intonálnak), ezzel hangszerük hangja a szó átvitt értelmében is *kiemelkedik* a többi hangszer közül, fényesebbnek hat. Tipikus, a vonósokra jellemző „betegség”, hogy hangoláskor a húrokat feljebb hangolják, a 440 Hz-es, normál „a” hang helyett az a-húr alapfrekvenciája kb. 444 Hz lesz.

Ez a frekvenciabizonytalanság teszi élővé a hangot, a (3) egyszerűsítéssel ezért sokat veszítünk a valósághűség terén. Ugyanennek az egyszerűsítésnek a következménye az is, hogy mivel egész hang távolság között csak egyetlen hang marad, pl. cisz (C^{\sharp}) és desz (D^{\flat}) nem megkülönböztethető, amíg egy vonós számára előbbi kicsit magasabb utóbbinál.

Vibrato nélkül a hang elveszíti fényét, nyerssé válik, ezt eredményezi (1) is. Ez azonban nem akkora megszorítás, mint az előző, mert a vibrato hatása utólagos járulékos modulációval utánozható.

A játékparaméterek diszkrétizálása (4) magában nem jelenti a hangminőség romlását, hiszen a felbontást igényeink szerint finomíthatjuk. Ha a paraméterek száma csak 3, felbontásuk 3 bit, amivel 8 állapot különböztethető meg, az összes variáció száma:

$$8^3 = 512 \tag{7.1}$$

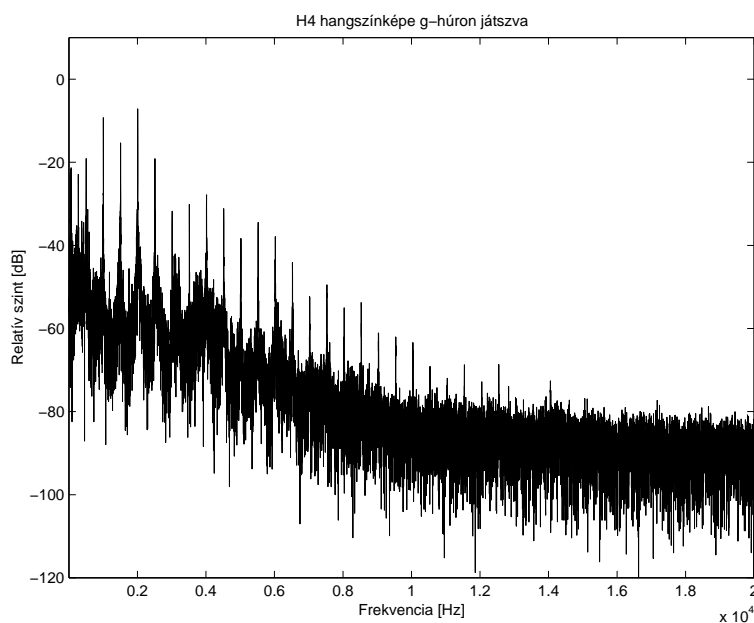
Első ránézésre ez nem is tűnik soknak. Figyelembe véve, hogy a hegedű hangterjedelme közel 5 oktáv, azaz 60 félhang, az eltárolandó adatbázis elemeinek száma

$$8^3 \cdot 60 = 512 \cdot 60 = 30720, \tag{7.2}$$

ami viszont igen nagy érték. Az adatbázist méretének csökkentése feltétlenül szükséges.

Vonós és pengetős hangszerek esetében vannak hangok, amiket több húron is lehet fogni. Például a hegedűn H_4 lefogható az a-húron, a d-húron és a g-húron is. Az így keletkező hangok magassága (alapfrekvenciája) megegyezik, felhangtartalmuk azonban jelentősen eltér. Mélyebb húron egy alapesetben magasabb húrra eső hangot lefogni a lábhoz sokkal közelebb kell, mint ha azt a magasabb húron fognánk le, a húr rezgő hossza tehát lecsökken. Egyrészt ennek köszönhetően tér el a két, egyébként egyező alapfrekvenciájú hang felhangtartalma. A másik ok a húrok anyag- és vastagságbeli különbsége.

A fenti tényt egy egyszerű méréssel alá lehet támasztani, amit mi elvégeztünk. A mérés során H_4 -et mindhárom lehetséges lefogási helyen megszólaltattuk és a hangot egy, a hegedűtől 1 m-re elhelyezett mikrofon segítségével rögzítettük ($f_s=44,1$ kHz-en). A regisztrátumok egy-egy közel állandósult szakaszából a Matlab *fft* függvényének felhasználásával abszolútérték spektrumot számítottunk. Ennek eredményeit mutatják a 7.1., 7.2., és 7.3. ábrák, amelyeken a referencia szintet az a-húron lejátszott hang maximális amplitúdójú komponense adja. Jól látható, hogy az a-húron megszólaló hang magasabb rendű felhangjai sokkal erősebben vannak jelen, mint a másik két húr esetében. A d- és g-húr közötti különbség jóval árnyaltabb, de látható.



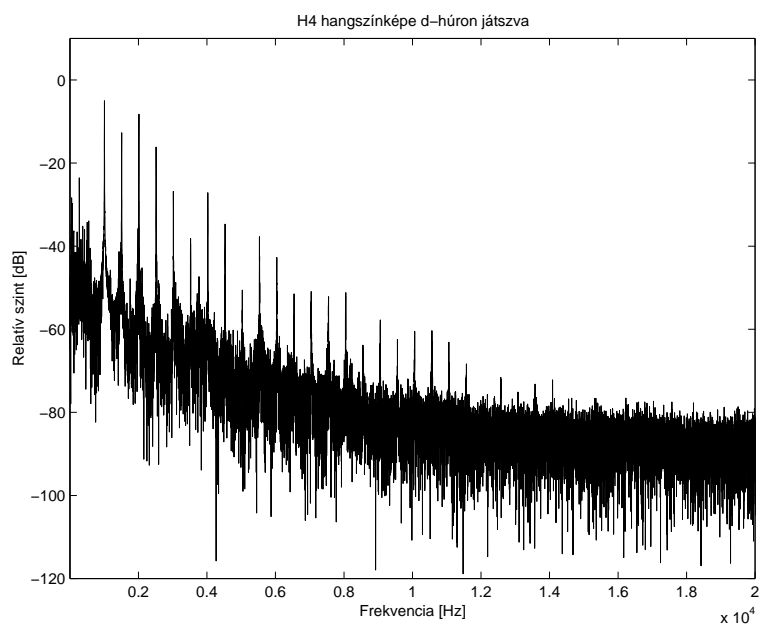
7.1. ábra. A g-húron megszólaltatott H_4 spektruma

Ha ezt a lehetőséget is kezelni szeretnénk, a félhangok száma kb. 36-tal nőne, mert az alsó három (g, d és a) húron a húronként 7 alapfekvésbeli félhanghoz egy oktávnyi új hang adódna (az adatbázis elemeinek száma a 7.2-ban kapott érték több mint másfélszerese lenne). További problémákat jelentene a hang kiválasztása a több egyforma közül. Szükséges egyszerűsítés ezért (5) is. Ide sorolható még a speciális hangok (pl. üveghang, pizzicato) használata is.

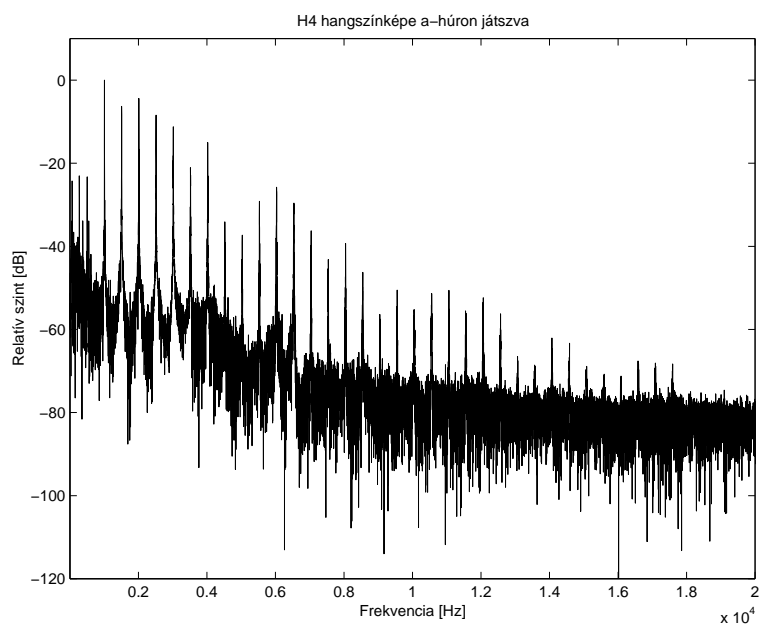
Látható, hogy a modellezéshez szükséges egyszerűsítések mind a szintézis mérvességét fokozzák, valamint korlátozzák a kifejezés szabadságát.

7.1.2. Szintéziskísérletek

A fenti egyszerűsítéseket elfogadva különféle kísérleteket végeztünk. Célunk nem a valóság-hű hangszintézis megvalósítása volt. Azt vizsgáltuk, előállítható-e egyszerű



7.2. ábra. A d-húron megszólaltatott H_4 spektruma



7.3. ábra. Az a-húron megszólaltatott H_4 spektruma

módon felismerhetően hegedű szerű hangzás, milyen jellemzői vannak a hegedűhangnak.

Első kísérletként néhány egyszerű hangregisztrátumból indultunk ki. Ezek állandósult szakaszaiból spektrumot számoltunk, aminek alapján meghatároztuk az alaphang zajsztintból kimagasló felharmonikusainak amplitúdóját és frekvenciáját is (a felharmonikusok frekvenciáival a diszperzió esetleges jelenlétét vizsgáltuk, erről a 6.2.1 részben is írtunk). Az abszolútérték spektrum alapján elmondható, hogy vonóval gerjesztett hegedűhangban nagyon sok felharmonikus van jelen (lásd pl. 7.3. ábrát a 84. oldalon). Az analízis eredménye alapján megfelelő frekvenciájú és amplitúdójú szinuszjeleket generáltunk majd ezeket összeadtuk. A szinuszjelek fazisát egyenlőnek állítottuk be. Ezzel nem követtünk el hibát, mert az emberi fül két, csak komponenseinek fazisában különböző jelet azonosnak érzékel [De Poli 92]. Az így előállt hang jellegében hasonlított a hegedűhang stacioner szakaszára, annak ellenére is, hogy az ítéletet a berezgési tranziens hiánya nagymértékben nehezítette.

A második kísérlet során a berezgési tranzienseket is figyelembe vettük. Egy, a [Márkus99]-ben ismertetett Matlab program segítségével a harmonikusok berezgésére harmadfokú IIR szűrőket illesztettünk. A szintézis során ezen szűrők állították elő az egyes komponensamplitúdók burkolóit. Az így modellezett hang egyértelműen vonóshangra hasonlított. A szintéziskor felhasznált felharmonikusok száma több mint húsz volt.

A kísérletek alapján kijelenthetjük, hogy a hegedűhangban jelenlévő harmonikusok száma nagy, a szubjektív felismeréshez a berezgési tranziensek nem mellőzhetők.

7.2. A fizikai modellen alapuló szintézis

A zongorasintézisről szóló fejezethez hasonlóan, a hegedű esetében is a hangszer ismertetésénél megszabott sorrendet követjük, ami összeegyeztethető a fizikai modellezésnél vázolt általános, hármass felosztással, ami a 3.1. ábrán, a 22. oldalon látható. Egyszerűbb esetben a rezonátor gerjesztés felé visszacsatolásának modellezésétől eltekinthetünk.

Mivel munkánk jelentős részét a hegedűtest átviteli függvényének mérési úton történő meghatározása és a mérések előkészületei tették ki, ez a fejezet is leginkább erre koncentrál. A vonásmodell esetében vázolunk egy könnyen megvalósítható megoldást, a húrmodellel pedig csak említésszinten foglalkozunk.

7.2.1. A vonásmodell

A tapadási súrlódáson alapuló vonás eredménye a fűrészfogszerű gerjesztőjel, ez egy elektrodinamikus elven működő érzékelővel (ami sebességgel arányos jelet ad) könnyen kimutatható. A húr kitérésével arányos jelet az eredeti jelből elektronikus úton történő integrálással kaphatjuk meg. Ilyen méréseket először, egymástól függetlenül, Müller és Bladier végeztek 1961 környékén [Cremer84]. Igaz azonban, hogy ez is csak egy közelítés, amiben nem vettük figyelembe pl. a húrok visszahatását,

valamint a vonó sajátrezgéseit. Ezek az egyszerű fűrészfog alakú jelet hullámossá, lépcsőssé teszik.

A gerjesztőjelre nagyon egyszerű modellt kapunk, ha vezérlőparaméterekkel közvetlenül a kitérés időfüggvényét módosítjuk a húr egy adott pontján. Az kitérés és a vezérlés közötti kapcsolatot leíró, akár nemlineáris függvények sorozatos mérésekkel meghatározhatók, digitálisan egy táblázatban tárolhatók, ahonnan szintéziskor, a paramétereknek megfelelő függvény könnyen kiválasztható.

Magát a kitérés időfüggvényét is jellemzhetjük paraméterekkel, ilyen lehet pl. az egyes szakaszok meredeksége, lépcsőzetessége. Például a fűrészfog-jel szakaszainak meredeksége a vonó sebességével van összefüggésben.

A vezérlőparaméterek két csoportra oszthatók. Az egyik a *dinamikus paraméterek* csoportja, ide a játék közben változó paraméterek –vonósebesség, vonónyomás vonás helye, vonó húrral bezárt szöge és a vonófelület – sorolhatók. A másik csoportot a játék közben egyáltalán nem, vagy csak nagyon lassan változó *statikus paraméterek* – pálca rugalmassága és tömege, szőrök feszítettsége és a gyantázottság (amelynek mértéke a játék folyamán csökken) – alkotják.

A játék során elég a dinamikus paramétereket figyelembe venni, hatásukat modellezni és a vezérelhetőséget biztosítani. A modellhez igény szerint választhatjuk ki a szükséges paramétereket.

7.2.2. A húrmodell

A húrok modellezése egy dimenziós waveguide alkalmazásával történhet. A megvalósítást nehezíti, hogy a húrok hossza a lefogott hangtól függően változik. A vibrato éppen ezért nem feltétlenül a waveguide paramétereinek módosításával, hanem kiegészítő modulációval modellezhető.

A hegedűhúrok rezgése nem írható le egyetlen egydimenziós hullámvezetővel, mindhárom irányú komponens megtalálható benne, sőt torziós rezgést is végez. Ezek modellezése húronként egy-egy waveguide-dal történhet, ami összesen 16 modellt jelent. A modellek kezelése kevésbé nehéz, mint azok paramétereinek meghatározása, erre ugyanis módszert még nem dolgoztak ki. A 4 waveguide-os húrmodell megvalósítása ezért még várat magára.

7.2.3. A sugárzó modellezése

Első közelítésben a húrokban kialakuló rezgés és a sugárzó által létrehozott hangnyomás közötti kapcsolatot egyetlen szűrő segítségével modellezhetjük, figyelmen kívül hagyva a test visszahatását. Ehhez a rendszer *mechano-akusztikai átviteli függvényére* van szükségünk. A rendszer bemenetének a húrláb tekinthető, mert a húrok rezgése itt csatolódik ki, ezen keresztül jut a tetőre. A rezgés mértéke lehet az amplitúdó, a gyorsulás, a sebesség vagy a húrlábra ható erő is.

A következő lehetőség a húrláb különválasztása a testtől. Ekkor a húrláb is és a test is külön átviteli függvénnyel adható meg.

Az átviteli függvény megvalósítható IIR szűrővel, vagy akár egy nagy felbontású equalizerrel is.

Mi a húrláb és a test együttes kezelését választottuk. Terveink szerint a BME Mérestechnika és Információs Rendszerek Tanszékén Matlab alá fejlesztett Frequency Identification Toolbox-szal illesztünk szűrőt a komplex átviteli függvényre.

Munkánk jelentős részét ennek az átviteli függvénynek mérési úton történő meghatározása és a mérések előkészületei tették ki. Az irodalomban fellelhető módszerek közül többet is kipróbáltunk, megismertük ezek korlátait. Mivel teljesen kielégítő eredményt egyik sem adott, további mérések elvégzését határoztuk el.

7.2.4. Átviteli függvény mérése mechanikus gerjesztéssel

A mérés elve a következő:

A húrt a húrláb közelében adott frekvencián rezgetjük. A húr rezgését a láb és a test hanggá alakítja, ahogy azt normál esetben is tenné. A létrejött hangot a hegedűtesttől kb. fél méterre lévő mikrofonnal érzékeljük. A keresett átviteli függvényt a hangnyomás és a gerjesztő erő hányadosaként, a mérést több frekvencián elvégezve kapjuk.

A legtöbb előkészület ezt a mérést előzte meg. Először a hegedű rögzítését kellett megoldani úgy, hogy a hegedű ne mozoghasson, de a rögzítés ne gátolja a hangszert a sugárzásban. Ehhez Dexion-Salgo elemekből egy keretet készítettünk, amin a befogóelemek több pozícióban is elhelyezhetők voltak. A befogóelemek fából készültek, filc borítással, hogy kellően merev és mégis puha megfogást biztosítsanak.

A gerjesztőjel előállítására egy jelgenreátorral meghajtott BK 4810 típusú Mini Shaker használtunk. A shaker végére egy gerjesztő csúcs is készült. Elgondolásunk szerint, ha egy hurokban végződő tüt a húrba akasztunk és előfeszítjük, a shakerrel az előfeszített állapot körül mozgathatjuk, a húrt visszaengedve ill. meghúzva. A csúcs először egy injekciós tű volt, aminek a végét kampóként visszahajtottuk, azonban a nagy igénybevétel hatására a kampó hamarosan kihajlott. Ezért a gerjesztő csúcs második verziója egy 1 mm-es fűrőből készült. A fűrő végét leköszörültük és visszahajlítottuk. Ez a megoldás már kellően merevnek bizonyult.

Az átviteli függvényhez szükségünk van a gerjesztőjelre, ami a mi esetünkben a húrra ható erő volt. Az erő méréséhez a shaker és a rezgető csúcs közé egy BK 8001 típusú impedancia-mérőfejet tettünk. Az impedancia-mérőfej 2 kimenettel rendelkezik, az egyik a fej gyorsulásával, a másikon a terhelő erővel arányos jel vehető le. A jel kondicionálásához egy töltéserősítő építésére is szükség volt.

A mérést 100 Hz-től 5 kHz-ig, 3 sávban, sávonként eltérő (5, 10 és 100 Hz) felbontással végeztük. A mérés során értékelhető adat csak 2 kHz alatt keletkezett, ezen frekvencia felett a shaker által létrehozott hang a hegedű hangjával összemérhetővé vált.

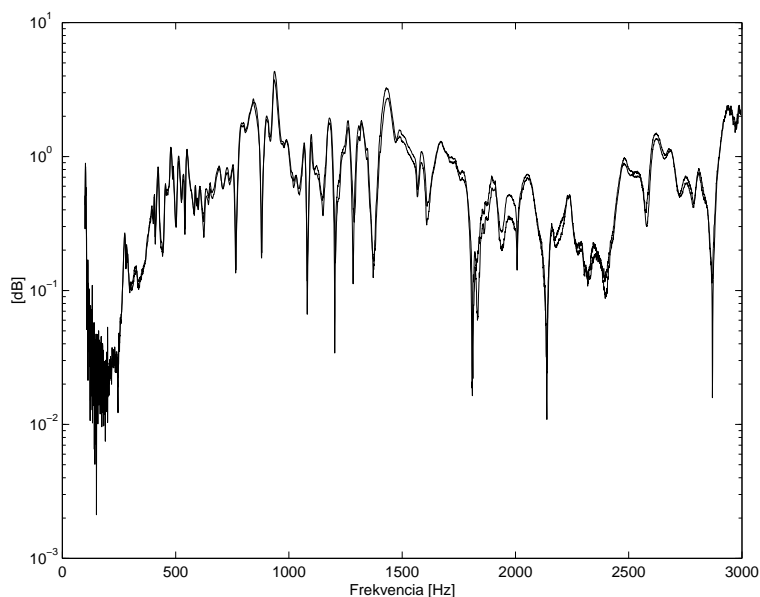
A mérést több mikrofon-pozícióval is megismételtük, jelentős javulás azonban nem történt. A problémáról Lily M. Wang¹-gal elektronikus postán keresztüli személyes konzultációk alkalmával megtudtuk, hogy a gerjesztő egység zaja az összes

¹PhD téziseit a hegedűakusztika területén folytatott kutatások alapján állította fel és védte meg 1999-ben, a Pennsylvania State University-n, jelenleg teremakusztikával foglalkozik.

mechanikai alapelvű mérést korlátozza. Az általa is javasolt módszerekről a következő részben lesz szó.

7.2.5. Átviteli függvény mérése inverz módszerrel

Az átviteli függvény meghatározása történhet inverz módszer alkalmazásával is. A mérés során egy hitelesített, gömbforrásnak tekinthető hangszórón kiadott szélessávú fehérzajjal gerjesztjük a hegedűt, aminek rezgéseit gyorsulásérzékelőkkel mérjük. Ezt a mérési módszert [Farina98] cikkben is említik. Ők egy fonográftűvel mérték a húrlábon létrejövő sebességet. A cikkben korlátnak az átviteli lánc nemlinearitásából eredő zajt említették. A méréshez süketszobai körülmények szükségesek, ezért a mérést a Híradástechnikai Tanszék csillapított mérőhelyiségében végeztük, LMS CADA-X mérőrendszer segítségével. A miniatűr gyorsulásérzékelőt a húrláb oldalára rögzítettük a váll fölé. Sajnos, még a legkisebb gyorsulásérzékelő tömege is összemérhető a húrláb tömegével, így azt a húrlábra helyezve a húrláb rezonanciafrekvenciája eltolódik (csökken), ez az átvitelt megváltoztatja. Ezért előnyösebb a lemezjátszó-pickup-os mérés, mert az a lábat kevésbé terheli. Ennek elvégzésére még nem volt lehetőségünk.



7.4. ábra. Átviteli függvény inverz módszer alapján (két mérési adat)

A mérési eredmények (a hangszóró hitelesítési görbéjével súlyozva) a 7.4. ábrán láthatók. A kapott átviteli függvényben nem találhatóak meg a hegedűkre jellemző rezonanciafrekvenciák, ez részben a láb terheléséből, részben pedig a gyorsulásérzékelő elhelyezéséből adódhat.

7.2.6. Egyéb mérési lehetőségek

A legígéretesebb mérés a *Dünnwald féle elektro-mágneses elvű erőerjesztővel* (force transducer) történő mérés lenne. Erre utalás ill. a módszer ajánlása megtalálható az irodalmakban ([Cremer84], [Pap94], [Kausel99], [Farina98]). Maga Dünnwald több mint 500 hangszert elemzett ezzel a módszerrel. Az erőerjesztő elve a következő: egy kb. 1,2 mm átmérőjű rézcső fut egy állandómágnes két pólusa között. Ha szinuszos áramot folytatunk át a rézcsövön, fellép az ún. Lorenz-erő, aminek hatására a cső kimozdul. Ha ezt a húrlábhoz nyomjuk, szinuszosan változó erővel gerjeszthetünk.

Sajnos az eszköz a dolgozat írásáig nem készült el, így az ezen alapuló mérést egyelőre még nem tudtuk elvégezni.

8. fejezet

Összefoglalás

A szerzők összetett feladatra vállalkoztak: két húros hangszer analízisének és szintézisének megoldását tűzték ki célul, amelyek közül az egyik – bár bőven akad rajta még fejleszteni való – meg is valósult.

A dolgozat az általánosan elterjedt szintézismódszerek összefoglalása és analízise után bemutatott és elemzett egy számítástechnikailag nagyon hatékony módszert, a *waveguide* modellezést. Megmutatta az átjárást a *waveguide* paraméterei és a *rezonátoros struktúra* között, és ezzel a *waveguide* modellezést egy új, az irodalom által eddig nem tárgyalt megközelítésbe helyezte. Szakítva a fizikai képpel, a *waveguide*-ot tehát a rezonátoros struktúra *approximációjának* tekinthetjük, mely így nem csak egy adott hangszer, hanem az általánosságban vett *periodikus jel* közelítő előállítására is alkalmazható. A jel komponenseinek frekvenciáját és lecsengését a *waveguide* paramétereivel, kezdeti amplitudóját és fázisát pedig a gerjesztőjel megfelelő megválasztásával állíthatjuk be. Bár a *waveguide* bevezetése az ideális húr modelljén keresztül történt, az előbbiekből következően az bármilyen *más melodikus hangszer* (pl. fúvósok, orgona stb.) hangjának előállítására is alkalmas. A különbséget az egyes hangszereknél a gerjesztés módja jelenti, azt minden egyes esetben külön-külön meg kell vizsgálni.

A következő fejezet a zongora működésének leírásával foglalkozott, megpróbálta feltérképezni a zongorahang kialakulása szempontjából fontos hatásokat. Összefoglalta az irodalom jelenlegi álláspontját, leírta az általunk kapott mérési eredményeket és rámutatott a zongora kutatásában meglévő fehér foltokra.

Bemutatásra került a *waveguide* zongorahang szintézisére történő felhasználása, a felmerült gyakorlati (és esetleg más jelfeldolgozási feladatokban is előforduló) problémákkal egyetemben. Az irodalomban található (főként más hangszerek modellezésére alkalmazott) módszerek leírását számtalan saját ötlet gazdagította. Ezek közül a legfontosabbakat kiemelve: dolgozatunk megadta az erő figyelembevételének a *nemlineáris kölcsönhatás* jelenlétekor nélkülözhetetlen és általunk helyesnek tartott módszerét, amely az impulzus egyik felének *időben és térben eltolt* bejuttatásán alapul. Megmagyarázta az *egypólusú hurokszűrő* kellemes hangzását a szűrő átviteli függvénye és a veszteséges húr lecsengési ideje közötti elvi kapcsolat megtalálásával. Egy, a specifikáció és a szűrő transzformációján alapuló új módszert mutatott be a *veszteségi szűrő* stabil és robusztus *tervezésére*. Rámutatott a csatolt húrok

figyelembevételére ajánlott Smith-féle módszer hiányosságára, javasolta annak kiegészítését a húrból és a lezáró impedanciából származó *veszteségek különválasztására* és bemutatott két módszert a paraméterek beállítására. A *kettős lecsengés* megvalósítására pedig egy számítástechnikailag hatékony, ugyanakkor megfelelő hangzást biztosító, a waveguide és a rezonátoros struktúra kombinációjára alapuló módszert javasolt.

A dolgozatban leírt zongoramodell a meghallgatások során jól szerepelt, ám akadnak még hiányosságai. A veszteségi szűrő tervezésére már sikerült megbízható módszerrel találkozni, ám ez a *diszperziós szűrő* esetére még hátra van. Ennél még jobb megoldást jelentene egy olyan *általános szűrőtervező algoritmus* kidolgozása, amely az *amplitudó és a fázishibákat külön kezelné*, ez nem csak a hangszintézisben, hanem más feladatok megoldásánál is segítséget jelenthetne (pl. szabályozástechnikai alkalmazásoknál, ahol a fázis a stabilitást jelentősen befolyásolja). Egy ilyen algoritmus alkalmazásával a jelenleg szükséges szűrő fokszáma jelentősen csökkenhetne. Megbízható, emberi beavatkozás nélkül működő algoritmusra van szükség a *húrok csatolt rezgésének* modellezésére javasolt módszer paramétereinek beállítására, ahol elsősorban a stabilitás kérdése jelenthet problémát. Nem megoldott továbbá a *rezonátorlemez* impulzusválaszának hatékony modellezése, ehhez azonban először pontosabb mérések elvégzésére van szükség. Meg kell továbbá oldani a paraméterek közötti interpolációt, azaz a nem mért hangok paramétereinek a mértékből történő előállítását, hiszen a zongora összes hangjának lemérése rendkívül nagy munkát igényelne.

A felépített modell hiányosságai ellenére elmondhatjuk, hogy a fizikai modellezésnek van létjogosultsága a zongorahang szintézisben. A gyakorlatban alkalmazott *PCM szintézis* ugyan az adott felvett hangra jobb minőséget biztosít (hiszen akkor nem kell mást tennie, mint az eredeti zongorahangot visszajátszania), de a megszólalás mindig azonos marad, ezzel a hangzást élettelenné téve. Bár egyszerű lineáris szűréssel megpróbálják a dinamikaváltozás hatását figyelembe venni, ez egy nemlineáris kölcsönhatás esetén nem jelent megfelelő megoldást. Az a tény, hogy a PCM szintézis *számításigénye jóval kisebb*, és a hangminősége is viszonylag megfelelő, a gyakorlati alkalmazás szempontjából a PCM szintézis malmára hajtja a vizet. A processzorok fejlődésével a későbbiekben azonban a fizikai modellezés valós idejű megvalósítása sem jelent majd problémát (a jelenlegi fizikai modellezést alkalmazó hangszerek tipikusan 4 vagy 8 hang egyidejű megszólaltatására képesek). A *fizikai modellezés* előnye tehát a *változatos hangzás*, amely egyrészt a gerjesztés nemlinearitásának figyelembevételéből ered, másrészt pedig abból, hogy az egyes paraméterek véletlenszerű apró elhangolása könnyedén megoldható. Csak a fizikai modell képes az olyan jellegzetességek pontos szimulációjára, mint a még rezgő *húr újbóli megütése* vagy az *una corda* pedál lenyomása. Az ideális zongoramodellt az összes húr egyidejű működtetése jelentené, amely így képes lenne a különböző húrok közötti csatolások figyelembevételére is, különös tekintettel a zengetőpedál hatására.

Talán némi magyarázatot igényel, miért van szükség a zongorahang szintézisére. Ennek elsődleges oka, hogy az *új zongorák* rendkívül *drágák*. Egy olcsó pianinó ára is magasabb a jelenleg kapható elektronikus zongoráknál (ez a nyugati országokban

különösen igaz, hiszen hazánkban egy használt hangszerhez viszonylag kedvező áron hozzájuthatunk). További probléma a zongora *nagy helyigénye*, és az, hogy *nagy hangereje* miatt a gyakorlás a környezetet zavarhatja. A jelenlegi, jobb „digitális zongorák” billentése már az eredeti zongorák billentéséhez elég közeli, hangjuk kellemes, de élettelen, és, a PCM elvéből adódóan csak a leütés abszolút sebességét veszik figyelembe. Az igazi zongoramechanika *késleltetését* figyelmen kívül hagyják, pedig annak kompenzálását a zongoristának nagyon fontos megtanulnia, hiszen az elektronikus hangszerket csak gyakorlásra használják, a darabok előadása hagyományos zongorán történik. Ha a hangszer a *mechanika komplett modelljét* tartalmazná és a lenyomott billentyű mozgását egy megfelelő érzékelővel pontosan követni tudnánk, azzal nagyban hozzájárulhatnánk a hangzás élethűségének és a gyakorlás életszerűségének javításához. A valóságos zongorák szintetizátorokkal történő kiváltása nyilvánvalóan értelmetlenség lenne, azoknak azonban, akik különböző okok miatt nem játszhatnak igazi hangszeren, nagy segítséget jelenthet egy *élethűbb zongoramodell* megalkotása.

A húros hangszeres szintézisével foglalkozó tudományos diákköri munka eleinte csak a zongorával foglalkozott. A hegedűn való játék sokrétű és összetett paraméterrendszerrel, illetve a művészi kifejezőeszközök nagy szabadsága miatt kezdetben a szerzők nem is mertek arra gondolni, hogy egyszer a hegedű is szintézis tárgya lehet. A fizikai modellalkotáson alapuló szintézis flexibilitásának és lehetőségeinek felismerésével új dimenziók tárultak fel a szerzők előtt. Ebből fakadó lelkesedésük odáig fokozódott, hogy elhatározták, a dolgot kiterjesztik a hegedűről szóló részekkel is.

A hegedűről szóló fejezet a hegedű felépítésével, a hangkeltés folyamatával foglalkozott, valamint bemutatta a játékparaméterek szerepét a hang kialakulásában, mindvégig szem előtt tartva a végső célt, valóság-hű hegedűhang szintézisét.

A szintézisről szóló részben először az additív szintézisről, mint a hegedűhang szubjektív megítélésének szempontjából fontos tulajdonságainak megismerését segítő módszerről ír. A fejezet második felében vázolja a fizikai modellen alapuló szintézis egyes fázisainak megvalósítási lehetőségeit, többek között egy érdekes és egyszerű lehetőséget a vonás paramétereinek leírására. Legvégül ismerteti a fizikai modell harmadik részét képező átviteli függvény meghatározására irányuló elvégzett és tervezett kísérleteket.

Irodalomjegyzék

Könyvek

- [De Poli 92] G. De Polli, A. Picali and C. Roads, „*Representations of Musical Signals*”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1992.
- [Fletcher98] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, „*The Physics of Musical Instruments*”, 2nd ed., Springer, New York 1998.
- [Morse48] P. M. Morse, „*Vibration and Sound*” 2nd ed., McGraw-Hill, New York 1948.
- [Oppenheim75] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, „*Digital Signal Processing*”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1975.
- [Tarnóczy82] Tarnóczy T., „*Zenei Akusztika*” Zeneműkiadó, Budapest 1982.
- [Cremer84] L. Cremer, „*The Physics of the Violin*”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1984.
- [Pap94] Pap János, „*A hangszerakusztika alapjai*” főiskolai jegyzet, Liszt Ferenc Zeneművészeti Főiskola, Budapest, 1994.

Folyóirat- és konferenci cikkek

- [Askenfelt90] A. Askenfelt and E. Janson, „From Touch to Vibrations. I: Timing in the Grand Piano Action”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(1): 52–63, July 1990.
- [Askenfelt91] A. Askenfelt and E. Janson, „From Touch to Vibrations. II: The Motion of the Key and Hammer”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(5): 2383–2393, Nov. 1991.
- [Askenfelt93] A. Askenfelt and E. Janson, „From Touch to Vibrations. III: String Motion and Spectra”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4): 2181–2196, Apr. 1993.

- [Boutillon88] X. Boutillon, „Model for Piano Hammers: Experimental Determination and Digital Simulation", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(2): 746–754, Feb. 1988.
- [Chaigne94a] A. Chaigne and A. Askenfelt, „Numerical Simulations of Piano Strings. I: A Physical Model for a Struck String Using Finite Difference Methods", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(2): 1112–1118, Feb. 1994.
- [Chaigne94b] A. Chaigne and A. Askenfelt, „Numerical Simulations of Piano Strings. II: Comparisons with Measurements and Systematic Exploration of some Hammer-String Parameters", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(3): 1631–1640, March 1994.
- [Conklin96a] H. A. Conklin, Jr., „Design and Tone in the Mechanoacoustic Piano. I: Piano Hammers and Tonal Effects", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(6): 3286–3296, June 1996.
- [Conklin96b] H. A. Conklin, Jr., „Design and Tone in the Mechanoacoustic Piano. II: Piano Structure", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(2): 695–708, Aug. 1996.
- [Conklin96c] [Conklin 1996c] H. A. Conklin, Jr., „Design and Tone in the Mechanoacoustic Piano. III: Piano Strings and Scale Design", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(3): 1286–1298, Sept. 1996.
- [Conklin99] H. A. Conklin, Jr., „Generation of Partial due to Nonlinear Mixing in a Stringed Instrument", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(1): 536–545, Jan. 1999.
- [Farina98] A. Farina, A. Langhoff, L. Tronchin, „Acoustic characterisation of „virtual" musical instruments: using MLS technique on ancient violins" *Journal of New Music Research*, Swets & Zeitlinger, vol. 27, N. 4, December 1998, 359–379.
- [Giordano96] N. Giordano and A. J. Korty, „Motion of a Piano String: Longitudinal Vibrations and the Role of the Bridge", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(6): 3899–3908. Dec. 1996.
- [Giordano97] N. Giordano, „Simple Model of a Piano Soundboard", *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(2): 1159–1168. Aug. 1997.
- [Giordano98] N. Giordano, „Mechanical Impedance of a Piano Soundboard", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(4): 2128–2133, April 1998.
- [Hiller71] L. Hiller and P. Ruiz, „Synthesizing Musical Sounds by Solving the Wave Equation for Vibrating Objects: Parts I and II", *Journal of*

the Audio Engineering Society, 19(6): 462–470 and 19(7): 542–550, June 1971.

- [Järveläinen99] H. Järveläinen, V. Välimäki and M. Karjalainen, „Audibility of Inharmonicity in String Instrument Sounds, and Implications to Digital Sound Synthesis”, to be published in *Proc. International Computer Music Conference*, Beijing, Oct. 1999.
- [Kausel99] Kausel, W., „VIAS – Opto-Acoustical Input-Admittance Measurement of String Instruments”, 1999
URL: http://iwk.mhsw.ac.at/english/research/vias/vias_e0.htm
- [Karjalainen98] M. Karjalainen, V. Välimäki and T. Tolonen, „Plucked-String Models: From the Karplus-Strong Algorithm to Digital Waveguides and Beyond”, *Computer Music Journal*, 22(3): 17–32, Fall 1998.
(URL: <http://www.acoustics.hut.fi/vpv/publications/cmj98.htm>)
- [Karjalainen99] M. Karjalainen, V. Välimäki, H. Räsänen and H. Saastamoinen „DSP Equalization of Electret Film Pickup for Acoustic Guitar”, presented at the *AES 106th Convention*, preprint No. 4907, Munich, May 1999.
- [Laakso96] T. I. Laakso, V. Välimäki, M. Karjalainen and U. K. Kaine, „Splitting the Unit Delay – Tools for Fractional Filter Design”, *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(1): 30–60, Jan. 1996.
- [Lang94] M. Lang and T. I. Laakso, „Simple and Robust Method for Design of Allpass Filters Using Least-Squares Phase Error Criterion”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems – II: ADSP*, 41(1):40–48, Jan. 1994.
- [Legge84] K. A. Legge and N. H. Fletcher, „Nonlinear Generation of Missing Modes on a Vibrating String”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 76(1): 5–12, July 1984.
- [Rocchesso96] D. Rocchesso and F. Scalcon, „Accurate Dispersion Simulation for Piano Strings”, *Proc. Nordic Acoustical Meeting*, 407–414, June 1996.
- [Smith92] J. O. Smith, „Physical Modeling Using Digital Waveguides”, *Computer Music Journal*, 16(4): 74–91, Winter 1992.
(URL: <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/>)
- [Smith93] J. O. Smith, „Efficient Synthesis of Stringed Musical Instruments”, *Proc. International Computer Music Conference*, 64–71, Tokyo, Sept. 1993.

- [Smith95] J. O. Smith and S. A. Van Duyne, „Commutated Piano Synthesis”, *Proc. International Computer Music Conference*, 335–342, Banff, Sept. 1995.
- [Van Duyne 94] S. A. Van Duyne and J. O. Smith, „A Simplified Approach to Modeling Dispersion Caused by Stiffness in Stings and Plates”, *Proc. International Computer Music Conference*, 407–410, Arhus, Sept. 1994.
- [Van Duyne 95] S. A. Van Duyne and J. O. Smith, „Developments for the Commuted Piano”, *Proc. International Computer Music Conference*, 319–326, Banff, Sept. 1995.
(URL: <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/>)
- [Välimäki96] V. Välimäki, J. Huopaniemi, M. Karjalainen and Z. Jánosy, „Physical Modeling of Plucked String Instruments with Application to Real-Time Synthesis”, *Journal of the Audio Engineering Society*, 44(5): 331–353, May 1996.
- [Välimäki98] V. Välimäki and T. Tolonen, „Development and Calibration of a Guitar Synthesizer”, *Journal of the Audio Engineering Society*, 46(9): 766–778, Sept. 1998.
- [Välimäki99] V. Välimäki, M Karjalainen, T. Tolonen and C. Erku, „Nonlinear Modeling and Synthesis of the Kantele - a Traditional Finnish String Instrument”, to be published in *Proc. International Computer Music Conference*, Beijing, Oct. 1999.
- [Weinreich77] G. Weinreich, „Coupled Piano Strings”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(6): 1474–1484, Dec. 1977.

Disszertációk, diplomatervek

- [Fürjes96] Fürjes A., „*Nyílt struktúrájú zenei hangszintézis digitális jelfeldolgozó processzorral*” diplomaterv, BME Elméleti Villamosságtan Tanszék, Budapest, 1996.
- [Márkus99] Márkus J., „*Orgonasípok hangjának jelmodell alapú szintézise*”, diplomaterv, BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék, Budapest, 1999.
- [Välimäki95] V. Välimäki, „*Discrete-Time Modeling of Acoustic Tubes Using Fractional Delay Filters*”, Thesis for degree of Doctor of Technology, HUT Acoustics Laboratory, Otaniemi, Dec. 1995. URL: http://www.acoustics.hut.fi/~vpv/publications/vesa_phd.html

Függelék

F.1. A zongora mérése

A mérés jellemzői

- A zongora típusa: August Förster Mod. 170. SN 135178.
- A mérés helye: BME Schönherz Zoltán kollégium
- A mérés időpontja: 1999. július 21–23.

Felhasznált eszközök

<i>rendeltetés</i>	<i>típus</i>	<i>érzékenység (EU/V)</i>
gyorsulásérzékelő 1.	PCB 353B13	1966
gyorsulásérzékelő 2.	PCB 353B13	1869
mikrofon	TMS13P10/TMS130B10	32.01
erőmérő kalapács	PCB 086C03	441
8 csatornás erősítő	PCB F482A20	
sztereó hangkártya	Gravis Ultrasound P&P	
személyi számítógép		

A hangkártya adatai

frekvenciaátvitel	20 Hz – 20 kHz (–3 dB)
sztereó áthallás	≤ -50 dB
harmonikus torzítás (THD)	≤ 0.01
jel-zaj viszony (SNR)	≥ 75 dB
névleges bemeneti jelszint:	-5 dBV _{rms}

A mérési körülmények jellemzése

A felhasznált eszközök kétcsatornás mérések elvégzését tették lehetővé. Az adott elektromechanikai átalakító a sokcsatornás erősítő bemenetére kapcsolódott, amelynek kimeneti jelét a személyi számítógép és a hangkártya segítségével rögzítettük, *wav* formátumban. Az erősítő minden esetben 10-szeres erősítésre volt állítva, gyorsulásérzékelőnek pedig az 1-es számút használtuk (ez alól kivétel a kalapács gyorsulásának mérése, ekkor a zongora kalapácsára a 2-es gyorsulásérzékelőt szereltük és az erősítő 1-szeres állásban volt).

A gyorsulásérzékelőt viasszal rögzítettük a hídhoz (ez 10 kHz-ig jó átvitelt biztosít), mindig közvetlenül a mért húrok mellett. A kalapácsra a gyorsulásérzékelőt ragasztószalag és vékony drótszál segítségével erősítettük fel (pontosabb eredményt kaptunk volna csavaros rögzítés esetén, de el akartuk kerülni a kalapácsban esetlegesen okozandó maradandó károsodást). A mikrofon az F4 hang felett helyezkedett el, a tőkétől 23, a rezonátorlemezről 11.5 cm távolságra. Az erőmérő kalapáccsal a hidat ütöttük, közvetlenül a gyorsulásérzékelő mellett.

Az elvégzett mérések

- A híd és a rezonátorlemez vizsgálata impulzus gerjesztéssel (a hidat erőmérő kalapáccsal ütve)
 - zengetőpedál lenyomása nélkül (a húrok filccel letompítva):
 - mért jellemzők: hídra ható erő – híd gyorsulása
hídra ható erő – hangnyomás
híd gyorsulása – hangnyomás
 - mért hangok: $C_1, G_1, C_2, F_2^\sharp, C_3^\sharp, F_3^\sharp, A_4^\sharp, G_5^\sharp, F_6^\sharp, F_7^\sharp$
 - mérések száma/hang: 20
 - zengetőpedál lenyomásával (a húrok tompítás nélkül):
 - mért jellemzők: hídra ható erő – híd gyorsulása
hídra ható erő – hangnyomás
híd gyorsulása – hangnyomás
 - mért hangok: $C_2, F_3^\sharp, A_4^\sharp, F_6^\sharp$
 - mérések száma/hang: 20
- Egy húr rezgésének vizsgálata zongorakalapács gerjesztéssel (a hármas illetve kettős húrok közül csak az egyik rezeghetett, a többi letompítottuk, és az una corda pedál is le volt nyomva):
 - zengetőpedál lenyomása nélkül:
 - mért jellemzők: híd gyorsulása – hangnyomás
 - mért hangok: $C_1, G_1, C_2, F_2^\sharp, C_3^\sharp, F_3^\sharp, A_4^\sharp, G_5^\sharp, F_6^\sharp, F_7^\sharp$
 - mérések száma/hang: 5 forte, 5 piano,
5 tompított húr (long. rezgés vizsg.)
 - zengetőpedál lenyomásával:
 - mért jellemzők: híd gyorsulása – hangnyomás
 - mért hangok: $C_2, F_3^\sharp, A_4^\sharp, F_6^\sharp$
 - mérések száma/hang: 3 forte
- A kalapács mozgásának vizsgálata (a hármas illetve kettős húrok közül itt is csak az egyik rezeghetett, a többi letompítottuk)
 - zengetőpedál lenyomása nélkül:
 - mért jellemzők: kalapács gyorsulása – híd gyorsulása
 - mért hangok: $C_1, G_1, C_2, F_2^\sharp, C_3^\sharp, F_3^\sharp, C_4, A_4^\sharp, G_5^\sharp, F_6^\sharp$
 - mérések száma/hang: legato: 2 piano, 2 mezzoforte, 2 forte,
staccato: 2 piano, 2 mezzoforte, 2 forte
- A zongora hangjának vizsgálata (a húrok tompítása nélkül, természetes körülmények között)

- zengetőpedál lenyomása nélkül:

mért jellemzők:	hangnyomás
mért hangok:	$C_1, G_1, C_2, F_2^\sharp, C_3^\sharp, F_3^\sharp, C_4, A_4^\sharp, G_5^\sharp, F_6^\sharp, F_7^\sharp$
mérések száma/hang:	legato: 2 piano, 2 mezzoforte, 2 forte, staccato: 2 piano, 2 mezzoforte, 2 forte

F.2. A hegedű mérése

Hangspektrumok vizsgálata

A mérés jellemzői

- A mért hegedű: G. P. Maggini hegedű kópia (készült a XIX. században)
- A mérések helye: BME HIT csillapított akusztikai mérőszoba
- A mérések időpontja: 1999. július-október

Felhasznált eszközök

- *B&K* Prepolarized Microphone SN 1901746
- *B&K* 2671 Előerősítő SN 1905484
- *Fostex D108* 8 csatornás digitális HD Recorder

A mérés leírása

A mérés hangregisztrátumok rögzítését és off-line feldolgozását foglalta magába. A hegedűt kézben tartva, vonó ill. pengetett gerjesztéssel szólaltattuk meg. A hangfelvételek kondenzátor mikrofonnal, digitális rögzítőre kerültek.

A létrejött állományok és ezek tartalma

penget: üres húrok, pengetve
 uresh: üres húrok, vonóval megszólaltatva
 alapf: az első fekvés első ujjal lefogott hangjai, vonóval
 harmad: a harmadik fekvés első ujjal lefogott hangjai, vonóval
 oktáv: oktávnál lefogott húrok, vonóval
 magas: oktáv utáni tercnél lefogott hangok, vonóval
 sulponti: a húrláb közelében vonóval megszólaltatott E_3
 sultasto: a fogólap fölött vonóval megszólaltatott E_3
 hhangok: g-, d- és a-húron lefogott H_4 , vonóval megszólaltatva

Átviteli függvény mérése (1)

A mérés jellemzői

- A mért hegedű: G. P. Maggini hegedű kópia (készült a XIX. században)
- A mérések helye: BME MIT tanácsterem
- A mérések időpontja: 1999. szeptember

Felhasznált eszközök

- Elektret mikrofon
- *B&K* 4810 Mini Shaker SN 1306861
- *B&K* 8001 Impedancia-merofej SN 1492134
- *Fostex D108* 8 csatornás digitális HD Recorder
- *HAMEG* 8131-2 függvénygenerátor
- Saját készítésű töltéserősítő, Dániel István (fizikus, BME-TTT) terveinek felhasználásával
- Hegedűbefogó keret
- Rezgető csúcs

A mérés leírása

A keretbe befogott hegedű a-húrját a shaker-re helyezett rezgetőcsúcs segítségével rezgettük. A shaker jelét a függvénygenerátor szolgáltatta. A létrejött hangot a mikrofon segítségével a digitális rögzítőre vettük fel.

A létrejött állományok és ezek tartalma

shaker: a shaker hangjának felvétele (100 Hz - 5 kHz), 100 Hz-enként, $U=500$ mVpp
also: gerjesztett hang felvétele (100 Hz - 250 Hz), 5 Hz-enként $U=300$ mVpp
kozep: ua. mint előbb, csak 250 Hz-től 1000 Hz-ig, 10 Hz-enként, $U=500$ mVpp
magas: ua. mint előbb, csak 1000 Hz-től 5000 Hz-ig, 100 Hz-enként, $U=1$ Vpp

Átviteli függvény mérése (2), inverz módszer

A mérés jellemzői

- A mért hegedű: G. P. Maggini hegedű kópia (készült a XIX. században)
- A mérések helye: BME HIT csillapított akusztikai mérőszoba
- A mérések időpontja: 1999. október

Felhasznált eszközök

- *B&K* Gyorsulásérzékelő
- *PCB* F482A20 8 csatornás erősítő
- *LMS CADA-X* mérőrendszer
- Tanszéki készítésű gömbhangforrás

A mérés leírása

A *CADA-X* mérőrendszer segítségével átviteli függvény mérése. A keretbe befogott hegedűt a gömbforrásba vezetett szélessávú fehér zajjal gerjesztettük, a gyorsulásérzékelőt a húrláb diszkant oldalára helyeztük, a váll fölé A mérési tartomány: 100 Hz-től 10 kHz-ig.

A létrejött állományok és ezek tartalma

vio.uni: a két mérésből származó auto-power spectrum, FRF és koherencia függvény pontjai
viokal.uni: a fenti két mérésből származó FRF a gömb sugárzó hitelesítési görbéjével korrigálva, sávhatárolva 3 kHz-ig.