

Diplomateru

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
MÉRÉSTECHNIKA ÉS INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TANSZÉK

DIPLOMATERV FELADAT

Márkus János

szigorló villamosmérnök hallgató részére
(nappali tagozat villamosmérnöki szak)

Orgonasípok hangjának jelmodell alapú szintézise
(a feladat szövege a mellékletben)

A tervfeladatot összeállította és a tervfeladat tanszéki konzulense:

dr. Sujbert László
posztdoktor

A záróvizsga tárgyai:

Stúdiótechnika a műsorszórásban
A jelfeldolgozás elemei
Jelfeldolgozó processzorok alkalmazása

A tervfeladat kiadásának napja: 1999. február 12.

A tervfeladat beadásának határideje: 1999. május 21.

dr. Görgényi András
adjunktus, diplomaterv felelős

Dr. Péceli Gábor
egyetemi tanár, tanszékvezető

A tervet bevette:

dr. Sujbert László

A terv beadásának dátuma:

1999. május 27.

A terv bírálója:

Jánosy Zoltán

Melléklet

Orgonasípok hangjának jelmodell alapú szintézise

Zenei hangok szintézisére manapság igen sok digitális eljárás létezik. Az egyik eljárás a hangok mintavételezése és visszajátszása (PCM), amely egyszerű, de hátránya – többek között – a kevés változtatható paraméter és a determináltság. A másik lehetőség a fizikai modellezés (PM), amely a PCM problémáit elvileg teljesen megoldja, de újabb problémákat vet fel. Egyrészt nem minden hangszer írható le egyszerű fizikai modellel, másrészt élethű hangzás előállítása nagy számítási sebességet igényel. Akusztikus hangszerek hangjának jelmodell alapú szintézise kompromisszumot jelent a fizikai modellezés és a PCM között. A jelmodell paramétereit azonban igen gondosan kell kiválasztani, elkerülendő a több évtizedes múltra visszatekintő ún. additív szintézis buktatóit.

A diplomaterv keretében orgonasípok hangjának jelmodell alapú szintézisét kell megvalósítani. A jelölt feladata az additív szintézis alapelemeinek megvalósításán kívül a jel harmonikus struktúrájának mérések segítségével történő meghatározása, valamint az egyes komponensek tranziens jellemzőinek mérése, illetve jelmodellbe történő integrálása. A rendszer tervezése során gondot kell fordítani arra, hogy a modell valós időben is működtethető legyen.

A fent részletezett analízis-szintézis feladatok megoldásához a MatLab programot, a megtervezett rendszer valós időben történő kipróbálására ADSP 2181 alapú EZ-KIT LITE jelfeldolgozó kártyát használjon.

dr. Sujbert László
posztdoktor

Nyilatkozat

Alulírott *Márkus János*, a Budapesti Műszaki Egyetem hallgatója kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a diplomatervben csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Márkus János
hallgató

Tartalomjegyzék

Kivonat	XIII
Abstract	XV
Előszó	1
1. A zenei hangok pszichoakusztikai jellemzői	5
1.1. Az állandósult spektrum	6
1.2. Tranziens folyamatok	7
1.3. Sztochasztikus jelenségek	8
1.4. Külső körülmények	9
1.5. Egyszerűsítő tényezők	11
2. Az orgona hangja	13
2.1. Az orgona felépítése	13
2.2. A sípok fizikai jellemzői	15
2.2.1. Az ajaksípok	16
2.2.2. A nyelvsípok	18
2.3. A sípok hangjának analízise	19
2.3.1. Mérési körülmények	19
2.3.2. Az állandósult spektrum	21
2.3.3. Sztochasztikus jelenségek	24
2.3.4. Tranziens folyamatok	28
2.3.5. Külső körülmények	35
3. A létező modellek	37
3.1. Hammond-orgona	37
3.1.1. A szintézis alapelve	38
3.1.2. Funkcionális egységek	38
3.1.3. A modell hanghűsége	40
3.2. Analóg áramkörös orgonák	41
3.2.1. A szintézis alapelve	41
3.2.2. Funkcionális egységek	41
3.2.3. A modell hanghűsége	43
3.3. A mintavételezéses eljárás	44

3.3.1.	A szintézis alapelve	44
3.3.2.	Redundanciacsökkentés	45
3.3.3.	A modell hanghűsége	46
3.4.	A fizikai modellezés	47
3.4.1.	A szintézis alapelve	47
3.4.2.	Modellalkotás	47
3.4.3.	A modell hanghűsége	48
3.5.	Következtetések	49
4.	A jelmodell alapú szintézis	51
4.1.	A koncepcionális jelmodell	52
4.1.1.	A periodikus jel modellje	52
4.1.2.	A jelmodell alkalmazása hangszermodellezésre	53
4.1.3.	Az integrált jelmodell	55
4.2.	A paraméterek származtatása	56
4.2.1.	A spektrum meghatározása	56
4.2.2.	Tranziens-modellezés	57
4.2.3.	A jellegzetes sípzaj modellje	61
4.2.4.	A vizsgált külső hatások modellje	64
4.2.5.	Hiányzó sípok paramétereinek becslése	65
4.3.	A jelmodell szimulációja	69
4.3.1.	A szimuláció vezérlése	69
4.3.2.	A diszkrét komponensek előállítása	70
4.3.3.	Burkolóillesztés	70
4.3.4.	A zaj implementálása	71
4.3.5.	A külső körülmények figyelembevétele	71
4.4.	Valós idejű implementáció	72
4.4.1.	MIDI-parancsértelmezés	73
4.4.2.	Dinamikus erőforráskiosztás	73
4.4.3.	Alapharmonikus előállítása	74
4.4.4.	Felharmonikusok generálása	74
4.4.5.	Burkolóillesztés	75
4.4.6.	A külső körülmények figyelembevétele	76
4.5.	Az implementációk minősítése	76
5.	Összefoglalás	77
5.1.	Eredmények	77
5.2.	Továbbfejlesztési lehetőségek	78
	Irodalomjegyzék	81
	Függelék	85
F.1.	A mért orgonák leírása	87
F.1.1.	Császár	87
F.1.2.	Naszály	89

F.1.3. Tata	91
F.2. A mérőeszközök technikai adatai	93
F.2.1. Mikrofonok	93
F.2.2. Technics RS BX-404 sztereó kazettás deck	93
F.2.3. Gravis Ultrasound P&P hangkártya	94
F.3. A kifejlesztett programok használata	95
F.3.1. Az analízis program	95
F.3.2. A MatLab szintézis-program	95
F.3.3. A valós-idejű DSP-program és kellékei	96
F.4. A CD-melléklet tartalma	97
F.4.1. Számítógépes adatok	97
F.4.2. Audio demonstrációk	98
F.5. Az ADSP-2181 EZ-KIT LITE kártya	100
F.6. A témához kapcsolódó érdekesebb honlapok	101

Rövidítések

103

Kivonat

A diplomaterv orgonasípok hangjának vizsgálatával, ezen belül analízisével és lehetséges szintéziseivel foglalkozik.

Először tárgyalja az orgonák használhatóságának bizonyos korlátait (nagy méret, hordozhatósági korlát, fenntartási költség), és az ennek következtében kialakuló elvárásokat egy orgonamodell paramétereivel szemben (kis méret, gazdaságos előállíthatóság, ugyanakkor jó hangminőség).

A jó hangminőség objektív értékelhetősége érdekében összefoglalja a zenei hangok pszichoakusztikai jellemzőit. Részletesen az állandósult spektrum (hangszín, hangmagasság), a tranzienst jelenségek (berezgés, lecsengés), a sztochasztikus összetevők (zaj, modulációk) és a külső körülmények (teremérzet, lokalizáció, csatolások) emberi hallás szempontjából fontos paraméterei kerülnek tárgyalásra. Ezen kívül a hallásmechanizmus olyan tulajdonságai is ismertetésre kerülnek, amelyek egyszerűsítési lehetőségeket hordoznak magukban (elfedés, fázisérzékletlenség).

A dolgozat az orgona felépítésének és a sípok jellemzőinek összefoglalása után a pszichoakusztikai paramétereket orgonasípok hangjára vizsgálja meg, eredeti hangminták segítségével.

A továbbiakban az orgona hangjának modellezésére eddig ismert eljárások objektív minősítése kerül tárgyalásra. A dolgozat röviden bemutatja az ismert szintéziseket (Hammond-orgona, analóg áramkörös orgonák, PCM-szintézis, fizikai modellezés), áttekinti alapelveiket, valamint működésük előnyeit és hátrányait.

Ezek után a diplomaterv a jelmodell alapú szintézis elvi hátterét és gyakorlati kivitelezésének lehetőségeit tárgyalja. Ismerteti a periodikus jel diszkrét idejű modelljét, amely a periodikus jel Fourier-sorfejtésén alapul, továbbá bevezeti az integrált jelmodellt, amely az alapkoncepció hangszerek modellezésére optimalizált változata. Részletesen elemzi a bevezetett jelmodell egyes blokkjainak elvi felépítési lehetőségeit, továbbá az egyes elemek paramétereinek sípfelvételekből történő származtatását. A továbbiakban bemutatja a szintézis szimulációját és valós idejű megvalósításának részleteit.

A dolgozat az összefoglalásban ismerteti a bevezetett jelmodell hatékonyságát, összevetve a már ismert szintézisekkel. Összegezi az analízis és a szintézis eredményeiből levonható tanulságos következtetéseket, valamint kitűzi az orgonasíppal kapcsolatos további modellezési lehetőségeket. A dolgozat végezetül a bevezetett jelmodell-alapú szintézis más hangszerekre történő adaptálásának lehetőségeit vizsgálja.

Abstract

This master thesis introduces the possibility of the *signal model based synthesis of the sound of organ pipes*.

First the limits of a classical organ are introduced (non-portability, maintenance cost), and according to these limits, the requirements of a model-organ are discussed (portability, economical reproduction and high-quality sound).

For the objective qualification of the existing methods and the signal model based one, the basic psychoacoustical parameters are discussed. These are the stationary spectrum (pitch, timbre), the transients (attack, decay), the quasi-steady properties (modulations, noise) and the external effects (reverberation, localisation). The properties of the hearing that can simplify a synthesis, are also discussed (phase-insensitivity, masking effects).

The paper discusses henceforth the psychoacoustical parameters of the organ pipes using introduced physical properties. The analysis is based on original pipe-records.

Next, the known synthesis methods are examined, including the Hammond-organ, the organs with analog circuits, the sampling method and the physical modeling. All of their advantages and disadvantages are discussed.

After a short summarizing of the existing methods, the paper introduces the signal model based synthesis. The synthesis applies a periodic signal model that takes into account the basic psychoacoustical parameters mentioned above, and is based on the Fourier-expansion of the periodic signals. Implementing the parameters of a musical instrument, the conceptual signal generator is completed with filters and also a noise-generator. The parameters of the model were derivated off-line from original pipe-records by means of signal processing tools.

The result of the method is convincing both for laymen and for musicians. Theoretically the introduced signal-model structure and the developed analysis method are also able to model other instruments that has no strong non-linear properties.

Előszó

Természeténél fogva az ember – érzékszerveivel, mérőműszereivel – az őt körülvevő világ megismerésére törekszik. Ezek közül a megismerési folyamatok közül az egyik legrégebbi a hangjelenségek vizsgálata, amely az idők során külön tudománnyá fejlődött. Az akusztika¹ szerteágazó területei közül pedig különösen érdekes a zenei akusztika, a hangszerek tulajdonságainak vizsgálata. A jelenlegi méréstechnikai műszerek és eljárások egyre precízebb ilyen tárgyú vizsgálatokat tesznek lehetővé, így sok érdekes jelenségnek ismerhető meg a pontosabb fizikai háttere.

Az ilyen irányú vizsgálatok egyik célja a híres akusztikus hangszerek (Stradivari-hegedű, Silbermann-orgona) minél részletesebb elemzése. A hangszerépítők „titkainak” objektív leírásával és a kimutatott összefüggések alkalmazásával a jó minőségű, illetve az adott kornak megfelelő hangzású hangszerek gyártását lehet elősegíteni. Hegedűk ilyen jellegű vizsgálata Magyarországon is folyt, nagyon jó eredménnyel [Tarnóczy82].

A hangszerek, illetve hangjuk minél pontosabb megismerésének másik célja a nem szállítható, drága, illetve ritka hangszerek helyettesítése gazdaságosabb, de hasonló minőségű hangszerrel (hangszintézis). Zenész körökben az ilyen kísérletek többféle megítélés alá esnek. Bizonyos vélemények szerint az ilyen – manapság főként digitális – szintetizátorok az igazi akusztikus hangszerek „halálát” okozzák, tehát kifejezetten károsak. A zenészek másik részének – valamint a hangszerfejlesztő mérnökök – hozzáállása az, hogy a digitális hangszerek nem az akusztikus hangszerek kiváltására, hanem praktikus helyettesítésére valók, ily módon elérhetővé téve a jó minőségű hangzást olyan körülmények között is, ahol az eredeti hangszert nem, vagy csak rendkívül gazdaságtalanul lehetne használni.

Ez az utóbbi igény fokozottan jelentkezik a sípos orgonánál. Egyrészt egy művészi szempontból megfelelő minőségű orgona előállítási és fenntartási költsége igen magas, nem mindenki számára elérhető. Sokszor csak kisméretű hangszerrel elégíthető ki egy-egy igény (próbatermek, gyakorlószobák), továbbá vannak olyan alkalmi rendezvények, amelyekhez „ideiglenes” orgonára van szükség (színházi rendezvények, művelődési házakban, sportcsarnokokban rendezett egyházi találkozók, vagy orgonatanfolyamok, ahol mindkét utóbbi igény fellép).

Indokolt tehát a sípos orgona hangszintézis-lehetőségeinek vizsgálata, és eljárások kidolgozása a sípok hangjának minél élethűbb reprodukálására.

¹Az akusztika a görög *ἀκουστικός* szóból származik, amelynek jelentése: hallásra tartozó, hallás- [G. szótár].

Rögtön felmerül azonban a kérdés, hogy az imént említett „minél élethűbb” fogalom pontosan mit jelent, milyen fizikai jellemzők tartoznak hozzá. Ennek meghatározása azonban nem egyértelmű. Nyilvánvaló, hogy az a művész, aki naponta több órán keresztül gyakorol, sokkal jobban ismeri hangszere hangját, mint az, aki koncerteken vagy műsorszóró médián (rádión, CD-n, esetleg csak televízión) keresztül ismeri az adott hangszert. Egy-egy ilyen jellegű szintézis alaposságát, minőségi paramétereit (egyszóval hanghűségét) tehát a potencióális felhasználók jellege is meghatározza. Többek között ezért is van a piacon sok olyan – közszükségleti kategóriájú – hangszer, amelyben ugyan rengeteg akusztikus hangszer hangja megtalálható, ennek ellenére – vagy éppen ezért – egy zenész saját hangszerének modelljét nem fogja jónak találni. A szintetizátorok egy másik – ugyanilyen célt kielégítő – kategóriájára (a professzionális kategóriára) általában az jellemző, hogy kevés hangszert modelleznek (pl. egy-két zongora hangszín, csak orgona), azokat azonban lényegesen igényesebben, meggyőzőbben reprodukálják, továbbá rengeteg hangszer-specifikus beállítási lehetőségük van.

A diplomaterv orgonasípok hangjának művészi igényeket is kielégítő modell-kísérleteit vizsgálja, illetve a már létező eljárások mellé bevezet egy új – részleteiben már eddig is ismert – hangszintézist.

A dolgozat 1. fejezete a zenei hangok, hangszerek azon jellemzőit foglalja össze, amelyek az emberi hallás szempontjából élethű hangszintézishez szükségesek. Definiálja a pszichoakusztika fogalmát, majd példákkal illusztrálva részletezi az egyes paramétereket. Ily módon ezen paraméterek segítségével a következő fejezetekben (2–4.) egyértelműen, objektíven lehet vizsgálni mind az orgona hangját, mind pedig az ismertetésre kerülő szintézisek minőségét.

A 2. fejezet az orgona bemutatásával foglalkozik. Röviden tárgyalja a hangszer felépítését és működését, majd részletesen ismerteti a „hanggenerátorok”, a sípok fizikai jellemzőit. A továbbiakban a sípok hangjának felvételével, valamint ezen hangfelvételek 1. fejezetben definiált paramétereinek kinyerésével foglalkozik egy-egy részfejezet.

A következő fejezet (3.) az orgonahang szintézisének eddigi műszaki megoldásait foglalja össze. Az egyes alfejezetek rendre bemutatják az orgonahang reprodukálására készült analóg és digitális szintéziseket, valamint ismertetik előnyeiket és hátrányaikat, különös tekintettel a már említett pszichoakusztikai paraméterekre. A fejezet az eddigi szintézisek jellemzőinek összegzésével zárul.

A 4. fejezet foglalkozik a jelmodellel. Az első alfejezet (4.1.) definiálja a periodikus jelmodellt, az ily módon megadott koncepcióra felépít egy szintézis-rendszert, és vizsgálja az egyes pszichoakusztikai jellemzők modellbe történő integrálhatóságát. A következő alfejezet (4.2.) a hallás szempontjából megvalósítandó paraméterek jelmodell-paraméterekké történő leképezését (transzformációját), valamint az ezt megvalósító MatLab programot ismerteti. A 4.3. és a 4.4. fejezetek rendre a létrehozott szintézis szimulációját és valós idejű működését ismertetik részletesen, alfejezetenként külön tárgyalva a megvalósított elemeket.

Az utolsó (5.) fejezet összefoglalja a bevezetett modellezési eljárás előnyeit és hátrányait az eddig ismert eljárásokkal szemben, nagy hangsúlyt fektetve a hang-

hűsége és a hatékonyságra. A fejezet – és a dolgozat – más hangszerek hasonló struktúrájú szintézisének lehetőségeivel és nehézségeivel zárul.

Itt szeretném megragadni az alkalmat, hogy megköszönjem mindazok munkáját, akik önzetlen segítsége nélkül ez a diplomamunka nem jöhetett volna létre.

Először is köszönetet mondok konzulensemnek, Sujbert Lászlónak, aki amellet, hogy minden szakmai kérdéssel kapcsolatos problémám esetén érdemben segített tanácsaival, többek között szerkesztői és tipográfiai javaslataival is pozitívan befolyásolta a diplomaterv formáját. Az ő javaslatára kezdtem el használni a \LaTeX szövegszerkesztő programot, amellyel jelen diplomamunka is készült.

Köszönetet mondok a tatai egyházmegye három lelkészének – név szerint Márkus Mihály tatai, ifj. Márkus Mihály naszályi és Szabó Lajos császári lelkipásztornak – az orgonasípok mérésének lehetőségéért.

Köszönetet mondok továbbá azon tanárainknak is, akik bevezettek az akusztika izgalmas kérdéseibe, többek között Horváthné Gembinczky Erzsébet tanárnőnek, Augusztinovicz Fülöp, Baráth Zoltán, Granát János, Illényi András és Takács Ferenc tanár uraknak. Ugyancsak köszönet illeti mindazokat, akik a digitális jelfeldolgozás rejtelseit tanították, név szerint Fehér Béla, Naszádos László, Németh Géza és Osváth László tanár urakat.

Köszönöm Jánosy Zoltán, Angster Judit, Miklós Ádám, és Fürjes Andor drótpostán (e-mailen) keresztül küldött hasznos tanácsait, valamint azt, hogy egyéb úton hozzá nem férhető irodalmakkal láttak el.

Köszönet illeti Wettl Ferenc tanár urat \LaTeX tanácsaiért, Farkasné Márkus Évát és Márkus Esztert a demonstrációs anyagok feljátszásáért, a Tata Városi Televízió vezetőjét, aki rendelkezésemre bocsátotta a televízió mikrofonjait, valamint azokat az ismerősöket és barátokat, akiktől számtalan – témához kapcsolódó – információ jutott el hozzám.

Végül köszönet illeti szüleimet, akik egyetemi éveim alatt a tőlük telhető legnagyobb mértékben támogattak.

1. fejezet

A zenei hangok pszichoakusztikai jellemzői

Egy hegedűművész néhány percen belül véleményt tud alkotni egy hegedűről, akár úgy, hogy kipróbálja, akár úgy, hogy csak hallja mások játékát az adott hangszerrel. Hasonlóképpen egy zongorista is felismeri a zongora hangja vagy billentése alapján, hogy angol vagy német rendszerű a zongora, esetenként a gyártó céget is azonosítani tudja. Orgonisták néhány síp(!) hangfelvétele alapján elég biztosan tudják azonosítani az orgona készítési idejét (barokk, romantikus, modern), illetve a készítő mester stílusát, azaz, hogy melyik „iskolába” járt (francia, délnémet, olasz). Hangszerkészítők, valamint zeneszeretők (vagy egy-egy hangszeret kedvelő) emberek is bírnak hasonló, hihetetlennek tűnő képességekkel [Tarnóczy82], [Angster90].

Nyilvánvaló, hogy ezek a tulajdonságok tanulás útján szerezhetőek meg, az ilyen bírálatok azon apriori ismeret segítségével születnek, hogy a véleményt alkotó már sok hangszer hallott, tudja, hogyan kell szólnia egy jó hangszernek és hogyan szól egy kevésbé jó minőségű hangszer. A probléma az, hogy a hozzáértők sokszor nem tudják véleményüket objektíven alátámasztani, egyszerűen „érik”, hogy egy hangszer jó, vagy rossz.

Mivel ezen vélemények többsége a hangszerek hangja alapján születik, ezért egy hangszer hangjában (pontosabban – mint azt az utolsó alfejezetben látni fogjuk – a hangszer *megfigyelő által hallott* hangjában) benne kell lennie az összes minőségi jellemzőnek is. A kérdés az, hogy hogyan lehet ezekhez a jellemzőkhöz hozzájutni.

A pszichofizikai mérések pontosan ezzel a problémakörrel foglalkoznak, vagyis az érzeti jellemzők és az adott jelenség objektív, mérhető fizikai jellemzői közti összefüggéseket határozzák meg, nagyszámú résztvevő segítségével. Ezen vizsgálatok általában úgy zajlanak, hogy a kísérleti résztvevőknek ugyanolyan környezeti feltételek mellett független értékelést, döntést kell hozniuk egy adott jelenségről, miközben a jelenség fizikai paramétereit mérik, majd az eredményt átlagolva, szabványos összefüggéseket definiálnak az érzeti és fizikai jellemzők között. Ilyen pszichofizikai mérésorozat volt például az ‘50-es években a CIE spektrális színösszetevő függvények szabványosítása [Ferenczy97].

Az előző bekezdésben definiált pszichofizikai analógiájára pszichoakusztika alatt a hanggal kapcsolatos érzeti vizsgálatokat, illetve fizikai leképezésüket értjük. In-

tenzív kutatása a telefon és a hangműsorszórás fejlődésével kezdődött, az érthető beszéd, illetve a nagy hanghűségű átvitel (FM rádió) szabványos paramétereit¹ is így állapították meg [Kishonti96].

Manapság a pszichoakusztikának három fő területe van. Az egyik a „tökéletes” hang- és térérzetviissaadással foglalkozik (például a Dolby Surround sokcsatornás hangviissaadási technika), a másik a veszteséges forráskódolást használó tömörítések optimalizálására irányul (jól ismert példa az MPEG-kódolás), a harmadik pedig a zenei hangok és szintéziseik minél pontosabb leírását tűzte ki célul. A következő alfejezetek ezen utóbbi terület jelenlegi kutatási eredményeit foglalják össze.

1.1. Az állandósult spektrum

A hangszerek sokféleképpen rendszerezhetők. Akusztikai szempontból egyik legjobb csoportosítás a gerjesztés szerinti, amely két részre osztja a hangszerek világát [Fletcher91]. Az egyik csoport az, amelynek tagjai impulzusszerű energiabevittel hozhatók rezgésbe, majd az így kialakuló szabadrezgés – általában valamilyen exponenciális jelleggel – fokozatosan lecseng. Ebbe a csoportba tartoznak a különféle ütős hangszerek (pl. dob, xilofon, zongora), valamint a pengetett hangszerek (pl. gitár, mandolin). A másik csoportba tartoznak azok a hangszerek, amelyeknél – legalábbis elvileg – biztosítható a folyamatos energiabevitel. Ebbe a kategóriába sorolhatók a vonós (hegedű, szitár, stb.) illetve a fúvós (trombita, fuvola, orgona, stb.) hangszerek.

Ez utóbbi csoportnál van értelme állandósult állapotról beszélni², amelynek közzismert jellemzője a jel frekvenciaösszetevőit ábrázoló spektrum (frekvencia-amplitúdó görbe).

Az állandósult spektrum – zenei szempontból – többféle összetevőt tartalmaz. Mindenképp domináns a hangszer hangmagasságát meghatározó alaphangfrekvencia, továbbá relatíve nagy amplitúdójúak az alaphangfrekvencia felharmonikusai³.

Ez utóbbiak „felelősek” a hangszer hangzásának fényességéért, a hangszínért. A kevés – és főként páratlan⁴ – harmonikusokat tartalmazó hangszereket lágynak érezzük (fuvola, furulya), míg a több felharmonikkal rendelkező hangszerek hangja fényes (trombita), vagy éppenséggel éles, kellemetlen (tangóharmónika, fűrészjel).

¹Pl. az érthető beszéd két fő paramétere ezek alapján a sáv szélesség (200-3400 Hz), és a jel-zaj viszony (min. 20 dB). FM-átvitelnél ugyanezek a paraméterek: 40 Hz-15 kHz sáv szélesség, min. 40 dB jel-zaj viszony.

²Impulzus gerjesztésű, nagy időállandójú hangszerek (pl. gitár) esetén általában a lecsengési szakaszban definiálható egy közel állandósult állapot, mivel azonban az orgona állandó gerjesztésű hangszer (lásd a 2. fejezetben), a továbbiakban ezzel nem foglalkozunk.

³Van olyan eset, amikor nem az alaphangfrekvencia amplitúdója a legnagyobb, de mégis meghatározza a hangmagasságot, mert ilyenkor a fül – illetve a hallóközpont – a felhangstruktúra alapján „kitalálja” a hiányzó alaphangot. Ezt mélyhangok lesugárzásánál mind orgonánál [Ellenhorst82], mind pedig hangszórórendszereken [Albert87, I. rész] ki is használják.

⁴Az irodalomban nem egyértelmű a páros-páratlan felharmonikus használata. Ebben a dolgozatban – a leginkább elterjedt gyakorlatnak megfelelően – az alaphangfrekvencia az első harmonikus illetve a nulladik felharmonikus komponens.

Néhány hangszernél, vagy egy adott hangszernél bizonyos körülmények között az állandósult spektrumban előfordulhatnak olyan nemharmonikus diszkrét komponensek is, amelyek jellegzetes hangszínváltozást okozhatnak. Akkor is feltűnő lehet egy ilyen hang, ha amplitúdója sokkal kisebb a harmonikus komponensek amplitúdójánál, pontosan azért, mert „kilóg” a felhangsorból [Albert87, I. rész], és a hallásmechanizmus az ilyen „nemtermészetes” jelenségeket fokozottabb érzékenységgel veszi figyelembe. Ilyen hangok akkor keletkezhetnek, ha egy hangszer gerjesztőjelének és a hozzá kapcsolt rezonátornak a felhang-struktúrája eltér egymástól, vagy két üreg között csatolt rezgések jönnek létre.

A harmadik megfigyelhető jelenség bizonyos hangszerek spektrumában a szélessávú zaj. Mivel ez a komponens a legkevésbé nevezhető „állandósultnak”, ezért részletesen az 1.3. fejezet tárgyalja, a sztochasztikus jelenségek között.

Összegezve elmondható, hogy a hangmagasság és a hangszín érzetjellemzők domináns meghatározói a mérés technikailag könnyen előállítható állandósult spektrumban megtalálhatók, és abból egyszerűen kinyerhetők.

1.2. Tranziens folyamatok

Számos irodalom hangsúlyozza a hangszerek tranziens jelenségeinek fontosságát. Egy állandó gerjesztésű hangszernél tranziens jelenségnek nevezzük a hangszer megszólalását (berezgését), illetve a hangszer hangjának lecsengését (elhalását). Impulzus gerjesztésű hangszereknél gyakorlatilag a teljes hangesemény egyetlen „tranziens”. Sokszor előfordul az is, hogy egy – egyébként állandó gerjesztésű – hangszer a gyors játékmód miatt el sem jut stacioner állapotba, vagy tisztán a tranziens megváltoztatásával más jellegű hangot ad⁵. A jelenség fokozottan jelentkezik a mélyebb hangoknál, mivel ott a megszólalási időállandók még nagyobbak.

Több kísérletet is végeztek arra, hogy a tranziens – azon belül elsősorban a berezgési – jelenségek pszichoakusztikai fontosságát megfigyeljék. Kimutatták, hogy bizonyos hangszerek, hangszercsoportok esetén a tranziens berezgést levágva a hangjel elejéről, a hangszereket a hallgatóság nem tudta azonosítani (pl. gitár és csemballó esetén) [Tarnóczy82]. Orgonasípokkal árnyaltabb kísérleteket is végeztek, zeneileg képzett hallgatóságnak kellett különböző síptípusokat megkülönböztetni tranzienssel, illetve anélkül. Míg az első esetben egyértelműen sikerült a sípokot megnevezni, addig a másodikban, tranziensek nélkül a felismerési hiba lényegesen nagyobb volt [Angster90]. Egy elektromos orgonán pedig kísérletképpen csemballószerű billentésérzékenységet valósítottak meg, és annak ellenére, hogy az állandósult spektrum megfelelt a síptípusoknak, a hangszer nem nyerte el sem a közönség, sem az orgonaművészek, sőt, még a készítő tetszését sem [Albert87, II. rész].

A tranziensek vizsgálata mérés-technikai szempontból azonban több problémát is felvet. Míg az állandósult spektrum képzésénél – amint azt a neve is mutatja – a frekvenciaváltozásokat elhanyagoljuk, addig a tranziens folyamatok vizsgálatánál

⁵A jelenségekre néhány ismert példa: a fagott gyors „lépkedő” futamai, a különféle mássalhangzókkal megfűjt fuvola hangja, a nagybőgő hallható „zümmögő” berezgése vagy a pánsíp jellegzetesen zajos vagy „köpködő” megszólalása.

a frekvenciakomponensek állandósága egyáltalán nem feltételezhető, sőt, sokszor a lineáris közelítés sem megfelelő. Mivel a berezgési folyamatok rövidek, a frekvenciafelbontást korlátozza a jól ismert frekvencia- és időtartomány közötti reciprocitási összefüggés, amely mintavételes rendszerekben könnyen belátható: ha a vizsgált időtartománybeli ablak hosszát (az időtartományban megkívánt felbontást) ΔT -vel, a rendszer mintavételi frekvenciáját f_s -sel, az alkalmazott Diszkrét Fourier Transzformáció (DFT) pontszámát pedig N -nel jelöljük, akkor a maximálisan elérhető frekvenciafelbontás

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{f_s}{\frac{\Delta T}{f_s}} = \frac{1}{\Delta T}, \quad (1.1)$$

mivel $\Delta T = N f_s$. Másképpen megfogalmazva, az idő- és frekvenciafelbontás szorzata alulról korlátos, együttesen nem lehetnek tetszőlegesen kicsik.

A különböző mérések és elméleti modellek szerint a fül $f < 1$ kHz alatt ennél egy nagyságrenddel jobb felbontásra képes [Albert87, I. rész]. A hallás folyamatának ez a fajta nemlineáris működése még nem teljesen tisztázott, tehát a fülhöz hasonló elemző rendszerről – bár pszichoakusztikai szempontból rendkívül hasznos lenne – le kell mondanunk, léteznek azonban egyéb módszerek a frekvenciafelbontás javítására. Az orgonasípok tranzienseinek vizsgálatára használható különféle lineáris és nemlineáris eljárásokról a 28. oldalon, a 2.3.4. fejezetben található további leírás.

1.3. Sztochasztikus jelenségek

Az állandó gerjesztésű hangszerek hangja (a legtöbb esetben hallhatóan) a tranziens jelenségek elmúlásával sem lesz egzakt értelemben periodikus az alapfrekvenciával megfelelő periódusidővel (éppen ezért az állandósult állapot megnevezés is félrevezető). Az instabilitás oka a vezérlés és/vagy a gerjesztés változása, illetve a gerjesztés és a rezonátor kölcsönhatásának érzékenysége lehet⁶. Vezérlésre (emberi beavatkozásra) példa a hegedűnél és a fuvolánál alkalmazott vibrató vagy tremoló, a gerjesztés változékonyságát okozhatja például a gyantás vonó egyenetlensége, illetve – fuvolánál, sípoknál – a beáramló levegő statisztikus ingadozása. A gerjesztés-rezonátor kölcsönhatás érzékenysége a rézfúvós és a sípszerű (ékhang-gerjesztésű) hangszereknél dominál [Tarnóczy82].

Ezek a fizikai jelenségek többféleképpen jelennek meg a hangszer hangjában. Egyik hatásuk az egyes harmonikus komponensek frekvencia- vagy amplitúdómodulációja (vibrató), vagy lassú fázisvándorlása a gerjesztés-rezonátor kölcsönhatása miatt [Albert87, I. rész]. Másik jellemző hatás az 1.1. fejezetben már említett szélessávú zaj megjelenése, amelyet általában a hangszer gerjesztése okoz. Ilyen jellegű tulajdonsága van a vonós hangszereknek (pl. hegedűnél jól hallható a magas hangoknál fellépő súrlódási zaj), illetve a levegősugárral gerjesztett hangszereknek (fuvola,

⁶Itt vezérlés alatt az emberi/művészi beavatkozás, gerjesztés alatt a hangszer elsődleges hanggenerátora értendő. A rezonátor pedig a hang domináns paramétereit határozza meg.

orgona ajaksíp). Ez utóbbira még bőven található példa a következő fejezetben (2.3.3.).

Annak ellenére, hogy a harmonikusokra ható modulációk mélysége, illetve a szélessávú zaj amplitúdója a diszkrét komponensekhez képest kicsi, pszichoakusztikai hatása igen jelentős. Ez azzal az elmélettel is alátámasztható, miszerint a fül lényegkiemelésének egyik módszere, hogy „derivál”, azaz a jel változásait figyeli. A ma ismert hallásmodellek ugyan ezeknek a jelenségeknek ennél pontosabb feldolgozását még kevésbé ismerik, mint a tranziensekét, de több kísérlet is vizsgálta hatásukat.

Orgonáknál a kismértékű lebegések eredője okozza a kóruszerű, telt hangzást (lásd még a következő fejezetet). A sztochasztikus jelenségeknek azonban nemcsak többszólamú játéknál van hatásuk, hanem szólisztikus esetben is. Nagypontosságú oszcillátorokkal előállított harmonikus hangokkal, valamint kismértékben modulált, ugyanolyan tagokból összeállított hangokkal kísérletezve, a közönségnek ez utóbbi nyerte meg a tetszését, a modulációkkal véletlenszerűbbé tett zenét nyilvánították „hallgathatóbbnak” [Albert87, I. rész]. Egy másik kísérlet során élő felvételtől kinyert amplitúdó és hangmagasság paramétereket alkalmaztak egyszerű szinuszos jelekre, és az így szintetizált játék alapján felismerhető volt az eredeti hangszer hangja [Piszcalski81].

Ezek a sztochasztikus jelenségek – megfelelő pontosságú mérőműszerekkel – elméletileg ki is mutathatók. Megfelelő jelfeldolgozási módszerekkel determinisztikus (pl. fő frekvenciakomponensek vibrátónál) és sztochasztikus (pl. várható érték, szórás a zajjelenségeknél) jellemzőik meghatározhatók, ily módon a tárgyalt pszichoakusztikai jelenségek objektívan vizsgálhatók mind hangszereknél, mind pedig hangszermodelleknél. Orgonasípokra hatékony módszereket a 2.3.3. fejezet mutat be, a sípfelvételek analízisének tárgyalásakor.

1.4. Külső körülmények

Az eddig tárgyalt pszichoakusztikai jelenségek fizikai megfelelői kinyerhetők voltak a hangforrás egyszeri, egyetlen hangjából. Bizonyos hangszereknek azonban vannak olyan jellemzői, amelyek vagy csak több hang egyidejű megszólalásakor észlelhetők, vagy pedig csak egy adott helyszínen, adott körülmények között jelentkeznek.

A polifónikus hangszerek⁷ egyik legjellemzőbb ilyen megfigyelhető paramétere a különböző hangok között létrejövő csatolás. Jó minőségű, tisztára hangolt zongora-típusú hangszereknél könnyen kimutatható a csatolás jelensége, amely abból áll, hogy egy húr a felhangjainak megfelelő húrokat (amennyiben a zenetőpedál engedélyezi) a közös sugárzófelületen keresztül megrezgeti. Ha ilyenkor lefogjuk a gerjesztő alaphúrt, akkor jól hallhatóan zeng a felhangsornak megfelelő „húrkészlet”.

A legnagyobb polifóniával rendelkező orgonánál ez a fajta csatolás nem annyira jelentős, mivel minden síp önálló hangsugárzó, azonban fellép két másik – hasonló fizikai alapokon nyugvó – pszichoakusztikai jelenség. Az egyik az akusztikai csatolás, amely a sok különálló működő hangforrás között jön létre. Mivel az orgonában

⁷Azok, amelyek egyszerre több szólamot is képesek előállítani (pl. zongora).

minden egyes síp kézzel készül, és külön hangolják őket, az egyes sípok apró ingadozásából érdekes interferenciák, lebegések alakulnak ki, amelyek a már említett telt, kóruszerű hangzásért felelősek. Ez okozza azt a jelenséget, hogy ha egy adott sípsor mellett megszólal egy oktávval magasabbra kialakított (kétszeres frekvenciájú) sípsor, az orgona „volumene” nemcsak hangerő, hanem „térfogat” értelemben is megnő [Tarnóczy82]. A másik csatolási mechanizmus az ún. *Mitnahme*-effektus („magával vivő hatás”), amely ajaksípokra jellemző. A jelenség két, egymáshoz közel elhelyezett, azonos névleges frekvenciájú, de kismértékben elhangolt síp esetén jöhet létre⁸. A jelenség lényege – mint ahogy neve is mutatja – az, hogy bizonyos körülmények között az egyik síp képes rákényszeríteni rezgését a másikra [Angster93]. A csatolás úgy észlelhető, hogy egy – önmagában, vagy külön meghallgatva a többihez képest – hamis sípsor a többi mellett „kitisztul”. A csatolás létrejötte sok fizikai paramétertől függ, eredménye viszont nagyon segíti a régi, elhanyagolt orgonák hallgathatóságát is.

Egy következő pszichoakusztikai fogalomkör a hangszer méretével, a független hangforrások elhelyezkedésével hozható kapcsolatba. Ezek a jelenségek a hangszerek közül főként az orgonánál észlelhetők, mivel ennél teljesül az, hogy mérete (pontosabban a független hangforrások egymáshoz képest mért távolsága) összemérhető a hangszer és a hallgató távolságával⁹. A hangszer méretét („tekintélyét”) érzékelteti az egyes sípok eltérő pozíciója, amely az orgona speciális felépítése miatt különösen dominál (lásd a 2.1. fejezetben). A hangszer ún. jelenérzetének ugyanez a fizikai háttere. Hiánya, vagyis monó vagy túl közeli hangforrások esetén a hangszer hangja beszűkül és hangszintézis vagy hangfelvétel esetén rögtön érezhető, hogy a hang nem élethű.

A külső körülmények között utolsóként még megemlítendő a teremhatás. Az orgonát legtöbbször nagy templomokban, koncerttermekben lehet hallani. Ezek zengése olyannyira befolyásolja a hallgatóság értékítéletét, hogy egy jó akusztikájú templomban még egy kevésbé jó minőségű orgonát is jobbra értékel, mint egy jó minőségűt egy rosszabb akusztikájúban. Egyesével, közelről hallgatva a sípokot, meglepően „száraz”, némelyiknél erősen zajos hangot, esetleg kellemetlen „szörcsögést” hallunk¹⁰. Az orgonától távol, a templomtérben a teremreflexiók ezeknek a jelenségeknek egy részét elfedik, viszont az orgona játszóasztalánál, közel a sípokhoz, lényegesen több ilyen „apróság” megfigyelhető. Egy-egy hangszer vagy hangszermodell minőségének eldöntésénél tehát ügyelni kell arra, hogy a bírálatot létrehozó közönség olyan körülmények között hallja a hangszert, amilyenben megszokta. Többek között ez is oka annak a bevezetőben említett ténynek, hogy a közszükségleti hangszerek minősége nem felel meg az orgonistáknak. Hasonló, kicsit már a másik véglet az az eset, amikor az orgonaművészek arról ismerik fel a szintetizált hangszert, mert az a levegőt tartalmazó szelládák hiánya miatt nem sziszeg, vagy a fújtatómotor nem zúg (és ettől úgy érzik, hogy a hangzás élettelen).

⁸Néha síp és felhangsípja között is észlelhető. Felhangsípnek nevezik azt a sípot, amely egy adott billentyűhöz tartozik, de alaphfrekvenciája n -szerese a billentyűhöz tartozó hangénak.

⁹Főként, ha a hallgató az orgonista, mert ő általában az orgona „tövében” ül.

¹⁰A CD-mellékleten több ilyen, köztérben felvett minta is található.

A külső hatások tehát nagyban meghatározzák egy hangszer szubjektív megítélését. Laikus megfigyelőknél, műélvezőknél például a „tipikus” orgonahang szétválaszthatatlanul összefonódik a templomokra jellemző nagy utánzengési idővel. Mivel ezek a hatások együttesen jelentkeznek, az orgona eredeti felállítási helyén, eredeti formájában, független fizikai mérésük csak rendkívül költségesen oldható meg¹¹. Éppen ezért a dolgozat a továbbiakban ezeket a hatásokat figyelembe veszi, valamint az irodalomban fellelhető elméleti modelleket és kísérleti eredményeket tárgyalja, mérés technikájukkal, elemzésük részleteivel nem foglalkozik.

1.5. Egyszerűsítő tényezők

Az eddigi fejezetek azokat a pszichoakusztikai paramétereket vizsgálták, amelyeket a fül egy zenei hangszer (különösen az orgona) minősítésénél figyelembe vesz, vagyis jó hangszintézisnél szintén figyelembeveendő. Ezzel szemben ez az alfejezet a hallás néhány olyan – szintén pszichoakusztikai – hiányosságát foglalja össze, amely kihasználásával ezen paraméterek gazdaságosabban valósíthatók meg. A hallás korlátozott dinamika- és frekvenciatartománya is egy ilyen tényező, de mivel az akusztikus hangszerek készítői ezeket a tényeket tapasztalati úton felismerték, az évszázadok során kialakult hangszerek közül egynek a hangja sem haladja meg ezeket a korlátokat.

A szintézis technikákban kihasználható egyik ilyen – régóta felfedezett, ennek ellenére mégsem közismert – jellemző az, hogy állandósult állapotban a fül nem veszi figyelembe az egyes frekvenciakomponensek relatív fázisát, vagyis két eltérő időfüggvényű jelet ugyanolyannak hallunk, ha frekvenciatartománybeli összetevőik amplitúdói rendre megegyeznek (a tranziensek során nem ilyen egyértelmű a helyzet). Ez akár azt is jelentheti, hogy amennyiben szinuszos komponenseink vannak, akár 0 relatív fázissal is összeadhatjuk őket. Ez a megoldás elméletileg tényleg jó, de az így eredményül kapott jel csúcstényezője ($k_m = A_m/A_{\text{eff}}$, ahol k_m a csúcstényező, A_m a jel maximuma és A_{eff} a jel effektív értéke [Fodor94b]) a többi megoldáshoz képest a legtöbb esetben maximumot ad, és ez rossz határfokú kihasználást okoz mind a digitális (véges szóhosszúságú) rendszerekben, mind pedig az analóg erősítőkből (amelyeket szükségtelenül nagyra kell méretezni).

A hallásnak ugyanebből a tulajdonságából levezethető a szélessávú jelek pontos időtartománybeli kialakításának szükségtelensége. A fül ebben az esetben is spektrumanalízist végez, sőt a spektrumnak is csak a burkolóját detektálja (ezt a jelenséget a fejezet elején említett pszichoakusztikai kódolók némelyike ki is használja) [Takács98].

A harmadik pszichoakusztikai fogalomkör – amely a legtöbb veszteséges forráskódoló algoritmus kulcsa – az elfedési effektus (masking effect). A jelenség mind idő- mind pedig frekvenciatartományban fellép, lényege, hogy egy nagyobb amplitúdójú komponens a mellette lévő komponensek hallhatóságát nehezíti. Időtartományban egy hirtelen dobütés, vagy zenekari tus előtt és után egy adott jelszintnél halkabb

¹¹Egy lehetséges megoldás teljes modell-orgona felépítése reflexiómentes akusztikai mérőszobában (süketszobában), lásd a [Gruschka97] irodalmat.

hangokat bizonyos ideig nem hallunk¹². Ugyanez a jelenség frekvenciatartományban úgy értelmezendő, hogy egy nagy amplitúdójú diszkrét vagy keskenysávú frekvencia-komponens közvetlen környezetében (a nagyobb frekvenciák felé erőteljesebben) a hallásküszöb megnő. Az így megváltozott hallásküszöb alá eső komponenseket nem kell megvalósítani (valójában inkább kisebb jel-zaj viszonyal kódolják [Kovács98]) [Takács98], [Illényi98]. Az időtartománybeli elfedések közül főként az utóelnyomás használható ki (mivel annak hosszabb az időtartama), a frekvenciaelfedés pedig főként az adott komponens feletti frekvenciákra hatékony.

A bemutatott egyszerűsítő tényezőket – ugyanúgy, mint az előző három alfejezetben leírt megvalósítandó paraméterek többségét – a jelmodell alapú szintézis-technika mind az analízis, mind a szintézis során használja. A bemutatott egyszerűsítő effektusok használata a 4.2. fejezetben kerül részletes ismertetésre.

¹²Az a látszólag akauzális jelenség, miszerint egy hangos jel egy már elhangzott hangeseményt elnyom, azzal oldható fel, hogy hangos jelekre a fültől az agyba az ingerület gyorsabban terjed.

2. fejezet

Az orgona hangja

Az orgonát nem méltatlanul nevezik a hangszerek királynőjének. Hangzásának sokszínűsége, hangszín-variációs lehetőségei, frekvencia- és dinamikatartománya mind-mind felülmúlják a többi akusztikus hangszer hasonló paramétereit. Ugyanakkor azt is el kell ismerni, hogy bizonyos szempontból igen korlátozottak a lehetőségei, például az orgonista befolyása a kitartott hangokra – a szerkezeti felépítés miatt – minimális, bizonyos esetekben a tranzien্স megszólalási jelenségeket sem tudja különböző billentéssel módosítani¹. Az azonban vitathatatlan, hogy az orgona zenei, építészeti és műszaki szempontból egyaránt csodálatos.

2.1. Az orgona felépítése

Az orgona különféle szerkezeti egységei sokféleképpen csoportosíthatók. Egy lehetséges – és hangképzés szempontjából egyik leglogikusabb – szerkezeti vázlat látható a 2.1. ábrán.

Az orgona hanggenerátorai dominánsan a sípok². A sípok megszólaltatásához szükséges levegőt a – manapság főként villanymotoros – fújtató állítja elő és tárolja, a hozzákapcsolódó levegőrendszer pedig a sípokhoz szállítja³. A levegő útját szelepek segítségével lehet szabályozni. A szelepeket az orgonista a játszóasztalon vagy játszószelekrényben elhelyezett kezelőszervekkel (billentyűzetekkel⁴, kapcsolókkal, egyéb kiegészítőkkel) vezérli [Klotz72].

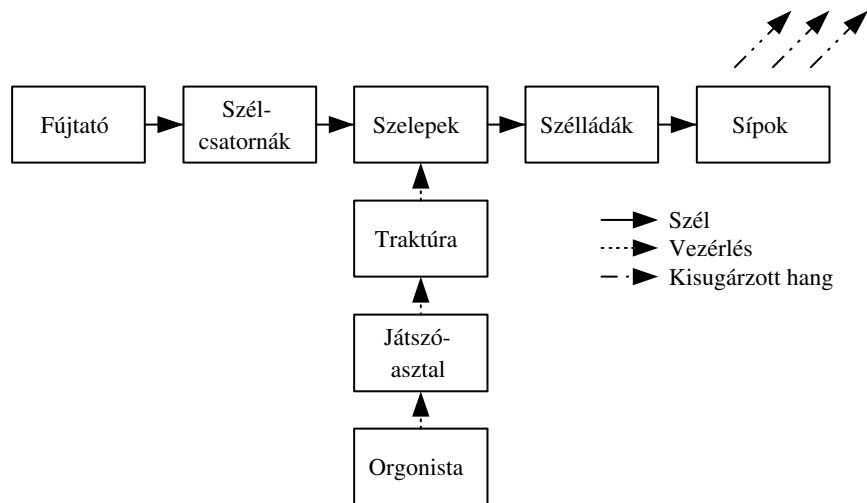
A vezérlő utasításokat az ún. traktúra továbbítja a szelepekhez. Az orgona több évszázados története során – a gyártástechnológián kívül – a traktúra az egyetlen,

¹Ellentétben például a hegedűvel (állandósult állapot), illetve a zongorával (billentésérzékenység).

²Nagy orgonákon egyéb hanggenerátorok is vannak, ilyen például a *Cimbelstern* vagy *Cimbelglocken*, amely csilingelő hangot állít elő. A dolgozat ezek hangját nem vizsgálja.

³Az áramló levegőt az orgonairodalomban *szélnek* hívják, a továbbiakban a dolgozat is ebben az értelemben használja. A szelet a fújtatóból a szélcsatornák vezetik a szellőárába, amin a sípok állnak.

⁴A kézzel működtethető billentyűzet neve manuál, ebből 1-5 lehet egy orgonában, a lábbal vezérelhető neve pedál, amely nagyobb orgonákban 27 hangos, kisebbekben (és főleg régebbiekben) 12 hangos, esetleg ki sem építik. A manuálok billentyűinek száma 49-61 között változhat.



2.1. ábra. Az orgona vázlatos felépítése

amely elvi felépítésében jelentősen megváltozott. Ennek kicsit részletesebb tárgyalása azért szükséges, mert ha egyáltalán lehetséges a kialakuló hangkép (főként a megszólalás) befolyásolása a zenész által, akkor az erősen a traktúrán múlik. A barokk orgonák mechanikus traktúrájúak voltak, ami azt jelenti, hogy a vezérlés forgó áttételek és húzólécek segítségével hatott közvetlenül a sípok alatt elhelyezett szelepekre. A XIX. században jelent meg a nagyobb orgonák vezérlését megkönnyítő pneumatikus traktúra, amely az információt az orgonában amúgy is meglévő szél segítségével továbbítja. Az elektronika fejlődésével párhuzamosan kezdték alkalmazni a század elején az elektromos traktúrákat, amelyeknél a billentyű a szelepnyitó relé áramát kapcsolja.

Orgonaművészek szerint a mechanikus traktúra képes billentési információt továbbítani [Ellenhorst82]. A tudományos vita erről már elég régóta tart, az orgona szélrendszerében végzett mérések, illetve szintéziskísérletek nem tudtak kimutatni ilyen összefüggéseket⁵ [Angster90] [Albert87, I-II. rész].

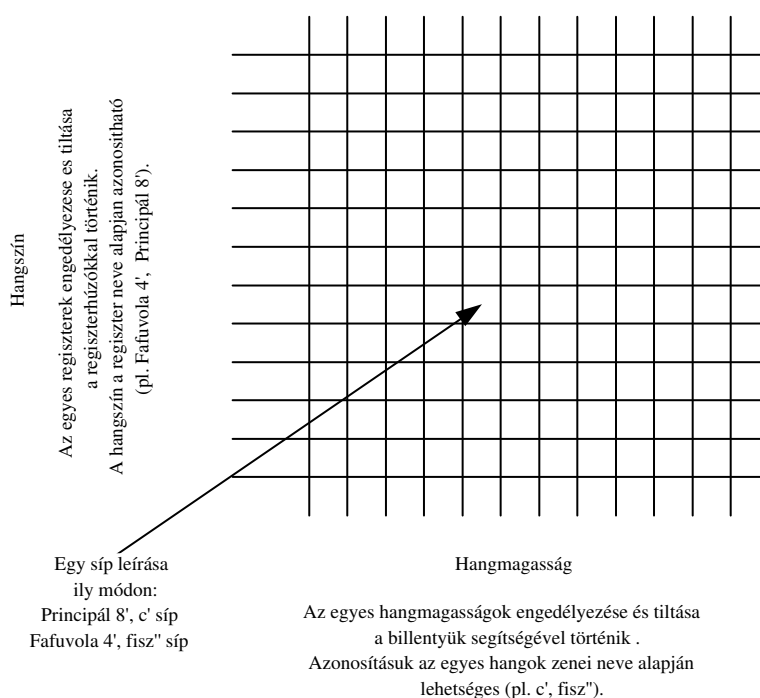
Az orgona hangkeltői, a sípok többféleképpen csoportosíthatók (anyag, típus, stb.). Az egyik csoportosítás – amely az orgona belsejében is rendező elv – a regiszterek szerinti. Egy regiszterben (egy manuálon vagy pedálon belül) minden billentyűhöz tartozik egy, ritkábban több⁶ síp, oly módon, hogy az adott regiszter hangját hallgatva, a hangkép kiegyenlített, vagyis minden sípot (*Mixtúrák* esetén sípcsoportot) ugyanolyan jellegűnek (lágy, fényes, stb.) ítélünk. A megfogalmazás

⁵Az vitathatatlan, hogy a mechanikus traktúrával érzékelhető legjobban a szelepnyitás ténye. Éppen ezért, Németországban a kisorgonákat ma is hasonló elven építik, de a nagyobb megbízhatóság érdekében bowdenes (tokoshuzalos) traktúrákat alkalmaznak.

⁶Például a billentyű nevének megfelelő névleges frekvencia 5–8-szorosának megfelelő alaphangfrekvenciájú sípok, amelyek külön úgysem használhatók. Ezek a „többhangú” regiszterek a *Mixtúrák*, az orgona fényes hangjáért felelősek, „felharmonikus-dúsító” szerepük van.

azért ilyen körülményes (illetve „pszichoakusztikai”), mert a kiegyenlített hangzás érdekében, a frekvenciaskála mentén mind a sípok fizikai paraméterei (méret, arányok, anyag(!)) mind pedig hangjuk mérhető fizikai jellemzői (spektrum, berezgés) is változnak.

Az egyes regisztereket választják ki a regiszterkapcsolók, egyszerre akár az összes regiszter is szólhat (de csak azok a hangok, amelyeket a billentyűvel engedélyezünk!). Ily módon az orgona sípjai egy mátrix-struktúrában ábrázolhatók (2.2. ábra), ahol a mátrix sorai a regiszterek, oszlopai az egyes billentyűk, elemei pedig a sípok (esetenként sípcsoportok). Ez a mátrix-struktúra orgonák belsejében is jól felismerhető, fizikailag is ugyanígy alakítják ki a sípok elrendezését⁷.



2.2. ábra. Az orgona sípjainak mátrixos elrendezése

2.2. A sípok fizikai jellemzői

Az egyes regiszterek azonos billentyűhöz – azonos névleges hangmagassághoz – tartozó sípjai hangkarakterben⁸ és alapfrekvenciában térnek el egymástól. A regisz-

⁷Az F.1. függelékben, a mért orgonák fényképein is jól látható a regiszterek és hangmagasság szerinti elrendezés. Ehhez járul hozzá a C-, Cisz-oldal szerinti tagolás, amelyről bővebb információ a 35. oldalon, a 2.3.5. szakaszban található.

⁸A hangkarakterbe a hangszínen kívül a síp összes pszichoakusztikai jellemzője (pl. a megszólalás) is beletartozik.

ternevek egy része a hangszínre utal, vagy egy hangszernévvvel (*Gamba, Blockflöte, Flöte*), vagy a hangszínre utaló jelzővel (*Lieblich, Nasat*), egy másik családja a síp anyagával (*Holzflöte*), fizikai megvalósításával (*Gedäckt*) vagy hangmagasságával (*Oktave, Quint*) hozható kapcsolatba. A regisztereket nevük mellett az ún. lábszám azonosítja. A láb eredetileg hossz mérték, azonban később részletesen ismertetésre kerülő okok miatt sípoknál nem a fizikai hosszúságot, hanem a relatív hangmagasságot jelöli [Klotz72]. Pl. a 8'-as (ejtsd: nyolc lábás) regiszter hangja „normális”, vagyis az egyvonalas *a* billentyű lenyomása esetén a megszólaló hang névleges frekvenciája 440 Hz. A 4'-as síp egy oktávval feljebb, a 16'-as egy oktávval lejjebb szól. Az 5 1/3' jelölésű síp a 8'-ashoz képest kvintként (1.5-szörös frekvencia) szól meg (ugyanazt a billentyűt lenyomva). Az alapregisztereknél magasabb regisztereket hívják felhangregisztereknek, feladatuk főként a hangszín formálása (önállóan ritkán használják őket), a 8'-asnál mélyebb regisztereket főként a pedálban használják, a basszus szólam erősítésére. A regiszterek száma határozza meg az orgona fizikai méretét is (kis orgonákban 3-12, közepesekben 15-40, nagyobbakban 60-140(!) regiszter található).

Minden regiszter tehát egy sípsorból áll. Az orgonaépítészet során – a hang előállításának szempontjából – kétféle síp alakult ki, az ajaksíp és a nyelvsíp (2.3. ábra), ezek egy regiszteren belül nem keverednek (mivel hangkarakterük teljesen más). Kisebb orgonákban csak ajakregiszterek vannak, nagyobb orgonákban is csak a sípok 10-15%-a nyelvsíp.

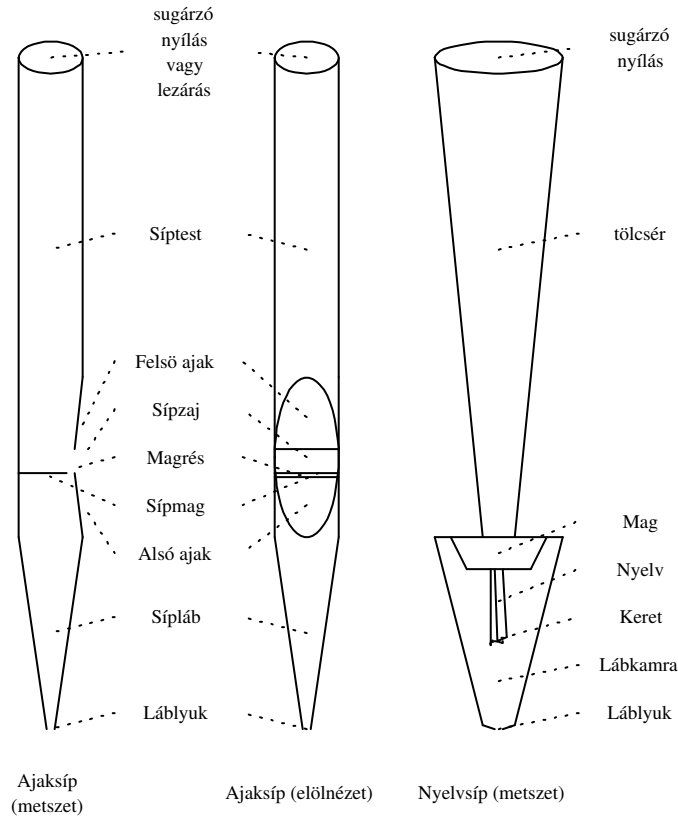
2.2.1. Az ajaksípok

Az ajaksípokban a fújtatóból érkező, szeleppel engedélyezett levegő a síplábon és a keskeny magrésen keresztül kiáramlik (létrejön egy levegőnyelv), és a felső ajakra ütközve, ékhangot (peremhangot) generál [Tarnóczy82], [Verge93]. Hangkeltési mechanizmusa tehát a furulyáéhoz hasonló. A kialakuló hang stabilitása és a hangerő akusztikai rezonátorral (síptest) növelhető. A sípszájnál kialakuló egyensúlyi turbulens áramlás matematikai leírása igen bonyolult, a sípméretek – és az ajaknyílás paraméterei – az évszázadok során alakultak ki, és csak az állítható paraméterek igen szűk értéktartományában keletkezik hallható hang⁹. Különböző hangszíneket – illetve a regiszteren belüli azonos hangszínerzetet – a síp méretarányainak¹⁰ változtatásával, illetve a rezonátor típusának megválasztásával (cilindrikus, kónikus, nyitott, zárt) lehet elérni [Ellenhorst82].

A rezonátor határozza meg a kialakuló hang alapfrekvenciáját is. Ez – többkevesebb pontatlansággal – számítható. Egy nyitott síp akusztikai modellje a mindkét végén sugárzó (nyitott) egydimenziós akusztikai tápvonal, a fedett síp pedig egyik végén zárt egydimenziós csőként modellezhető. A hangtér egyszerűsített hullámegyenletét felírva és a megfelelő peremfeltételeket kielégítve, eredményül azt kapjuk, hogy mindkét sípban állóhullámok alakulnak ki, amelyek hullámhosszának a

⁹A síp legyártása után az ún. *intonáció* során állítják be – síponként – ezeket a paramétereket.

¹⁰Ezeket hívják *menzúráknak*, amelyeket az orgonaépítő mesterek táblázatok formájában adtak tovább egymásnak nemzedékről nemzedékre.



2.3. ábra. Az ajak- és nyelvsípok

következő képleteket kell kielégítenie:

$$l = (2k) \frac{\lambda}{4}, \text{ ahol } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

mindkét végén nyitott sípnál, illetve

$$l = (2k - 1) \frac{\lambda}{4}, \text{ ahol } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

egyik végén zárt sípnál, ahol l a síp hossza, λ pedig a létrejövő hang hullámhossza (a $k = 1$ -hez tartozó hullámhossznak megfelelő frekvencia pedig a síp alaphangfrekvenciája) [Horváthné98].

Az egyenletekből két – téves – következtetést lehet levonni. Az egyik az, hogy a sípoknak végtelen sok harmonikus komponense van, a másik pedig az, hogy ha egy nyitott sípot egyik végén lezárunk, akkor a keletkező alaphang hullámhossza $l/2$ -ről l -re változik, vagyis a frekvencia felére csökken, a síp egy oktávval mélyebben szól. Ez utóbbit kipróbálva valódi sípon, azt tapasztaljuk, hogy hallhatóan nagy az eltérés. A magyarázat az, hogy mindkét következtetés figyelmen kívül hagyja azt a tényt, hogy a levezetés tisztán „egydimenziós sípot” vesz figyelembe, $d = 0$ átmérővel, a valódi sípok átmérője pedig a hossz százalékos nagyságrendjébe esnek. Ezért

egyrészt a létrejövő legnagyobb frekvenciájú harmonikus komponensre is teljesülnie kell, hogy $\lambda_{min} > d/4$ [Tarnóczy82], valamint a véges átmérő miatt a nyitott végek peremfeltételei nem a síp végén lesznek, hanem „kitolódnak” a sípból. A kitolódás mértékére (a végkorrekcióra) számtalan elmélet és empirikus konstans született, a fenti egyenleteket az átmérő figyelembevételével tehát a következőképpen kell felírni:

$$l + \Delta l_1(d) + \Delta l_2(d) = (2k) \frac{\lambda}{4} \quad (2.3)$$

mindkét végén nyitott sípnál, illetve

$$l + \Delta l_1(d) = (2k - 1) \frac{\lambda}{4} \quad (2.4)$$

egyik végén zárt sípnál, ahol Δl_1 jelenti az ajaknál fellépő korrekciót, Δl_2 pedig a nyitott végnél fellépőt. Így már látszik, hogy az oktávval mélyebben szóló fedett síp nem lesz pontosan fele olyan hosszú, mint a nyitott, továbbá (mivel Δl_1 és Δl_2 függvénye az átmérőnek, d -nek) két azonos alaphfrekvenciájú, eltérő menzúrájú síp hossza sem lesz egyforma. Ez tehát az oka annak, hogy a lábszámolás nem a fizikai hosszt jelenti, hiszen akkor minden regiszternek eltérő száma lenne. Hagyományosan a lábszám egy adott regiszter esetén a nagy C billentyűhöz tartozó síp alaphfrekvenciájának megfelelő *Principál* síp hosszát jelöli.

A sípok vizsgálatához, illetve hangjuk szintetizálásához, ismerni kell még azt is, hogy a síp által létrehozott hang hogyan kerül kicsatolásra. A kicsatolás elméletileg a síp nyílásain, illetve falán jöhet létre. Az ezzel kapcsolatos vizsgálatok azt mutatják, hogy a fal rezgései egyrészt kis amplitúdójúak, másrészt főként olyan (torziós) típusúak, amelyeknek sugárzási hatásfoka igen rossz. Így jó eredményt ad a nyitott sípokat két pontszerű sugárzóként modellezni, a fedetteket pedig az ajaknál lévő sugárzóként¹¹ [Angster90].

2.2.2. A nyelv sípok

A nyelv sípok (2.3b ábra) hangkeltése a rezgőnyelves hangszerekével ekvivalens (pl. klarinét). A beáramló levegő egy fémmylvet hoz rezgésbe, a kialakuló rezgés sokkal stabilabb és élesebb (nyersebb) lesz, amelyet a ráillesztett rezonátor már nem tud annyira befolyásolni. A tölcser feladata ebben az esetben főként a hang optimális kicsatolása, esetenként némi spektrumformáló (formáns-létrehozó) szerepe van.

Éppen ezért a nyelv sípok hangja sokkal erőteljesebb, mint az ajaksípoké, a fémlemez-rezgés miatt sokkal nagyobb felharmonikus-tartalommal. Hangjuk miatt kevesebb van belőlük, jóval ritkábban is alkalmazzák őket.

Az előző fejezetben részletezett végkorrekció-probléma – mivel itt nem a rezonátor határozza meg az alaphfrekvenciát – nem jelentkezik, a síphang kicsatolása pedig csak a rezonátor nyitott végén jöhet létre.

¹¹A pontszerű sugárzás feltétele ($d \ll \lambda$) csak az alacsonyabb sorszámú harmonikusoknál teljesül, nagyobb frekvencián a síp irányítottá válik.

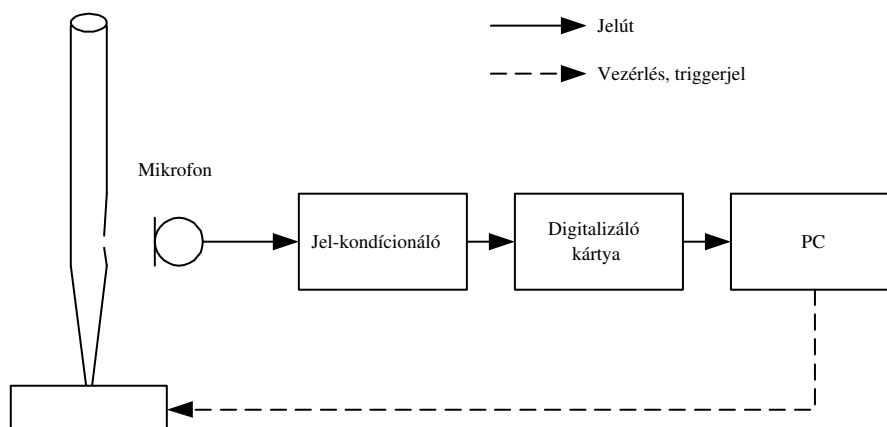
2.3. A sípok hangjának analízise

Az orgonahang pszichoakusztikai paramétereinek vizsgálata, az eddig megvalósított szintézisek objektív bírálata, valamint a jelmodell alapú szintézis paramétereinek meghatározása érdekében mérések készültek Komárom-Esztergom megye három orgonáján. Az egyes orgonák részletes leírása (regiszterek, traktúra) az F.1. függelékben található, a felvett minták a CD-melléklet adatkönyvtárában érhetőek el (lásd az F.4. függelékben). Két manuál-regiszternek és egy pedál-regiszternek történt meg a teljes skála menti felmérése, a többiből oktávonként egy illetve két minta került rögzítésre. Mindegyik regiszter ajakregiszter, a két teljesen felmért manuál regiszterek a császári orgona *Principál* és a naszályi orgona *Bourdon* sípsora.

A vizsgált orgonák egyikén sem volt nyelvsíp, így ezek elemzéséről a továbbiakban le kell mondanunk.

2.3.1. Mérési körülmények

A sípok hangja – a további feldolgozás egyszerűsítése érdekében – közvetlenül számítógépre lett rögzítve. A mérési elrendezés a 2.4. ábrán látható.



2.4. ábra. Mérési elrendezés

A rendszer elemei:

- Mikrofon:
 - 1 darab *Akai ACM-50* mikrofon (a tatabi és naszályi orgonák mérésénél);
 - 2 darab *AKG C-747* mikrofon (a császári orgona mérésénél)¹²;
- Előerősítő: *Technics RS BX-404* típusú sztereó kazettás deck erősítő fokozata;

¹²Ezért csak a császári orgona sípjainál lehetett vizsgálni a sípszáj és a felső nyílás eltérő sugárzási jellemzőit azonos triggerjel esetén.

- Digitalizáló kártya: *Gravis Ultrasound P&P* hangkártya;
- Számítógép: IBM-kompatibilis PC.

Az egyes részegységek technikai adatai az F.2. függelékben található meg, az összeállított rendszer teljes elektromos zaja a hangkártya maximális kivezérléséhez képest -71 dB alatt maradt¹³.

A mérést két külső körülmény is nehezítette. Az egyik a templomok nagy utánzengése, ami miatt a hangfelvételek lecsengési karakterisztikái nem feltétlenül a sípok tulajdonságát adják vissza, a másik pedig a környezeti alapzaj, amely a kívülről jövő zajokból (járművek, gépek hangjából), a fűtatómotor zajából és a tömítési hibákból eredő levegősziszegésből tevődött össze. A méréseknél mindig készült zajsztintmérést is, az eredményeket a 2.1. táblázat foglalja össze. A császári orgonamotor viszonylag régi, az orgonaszekrény aljában található úgy, hogy az orgonaházhoz hozzáér a motort burkoló fából készült szekrény. A naszályi orgona motorja is benne van az orgonaházban, de a motor teljesen új. A tatai orgona motorja a legrégebbi, de a templom belső terén kívül(!), az oldalbejárat padlásán van. A mért arányok nagyon jól tükrözik a három megoldás minőségét.

2.1. táblázat. Jellemző jel-zaj viszonyok az egyes helyszíneken

Helyszín	Jel-zaj viszony (dB)	
	SNR _{p-p}	SNR _{eff}
Császár	30.78 dB	36.08 dB
Naszály	40.66 dB	49.57 dB
Tata	45.18 dB	54.52 dB

Mind a zaj, mind a teremhatás kiküszöbölhető szelektív iránykarakterisztikájú, a mérendő hanghoz közel helyezett mikrofonnal. A használt mikrofonok mindegyike kardioid típusú volt, a hangforrástól való távolság azonban 4-15 cm között változott. Egyrészt a hozzáférés volt korlátozott az orgona belsejében lévő zsúfoltság miatt, továbbá a mikrofonok előerősítő fokozatai határoltak, illetve a túl közel helyezett mikrofon a síp hangját is befolyásolta a 2.2.1. fejezetben tárgyalt végkorrekció jelensége miatt.

A sípok hangja – a jelsztintmódosítás után – $f_s = 44.1$ kHz-es mintavételi frekvenciával, 16 bites felbontással került rögzítésre a számítógép merevlemezén. A mérések triggerelése manuálisan történt, a mikrofon(ok) mérendő sípához történő beállítása után. A rögzítés a billentyű lenyomása előtt 0.5-1 másodperccel indult¹⁴, a billentyű az 5. másodpercben lett elengedve, az egyes rekordok 7 illetve 8 másodperc hosszúságúak lettek (mélyebb sípoknál hosszabbak). A mérési rekordok megtalálhatók a CD-mellékleten riff wave (*.wav) fájlformátumban.

¹³A digitális rendszerekben elterjedt gyakorlatnak megfelelően a továbbiakban is a maximális kivezérlhetőség lesz a (0 dB-es) referenciaszint.

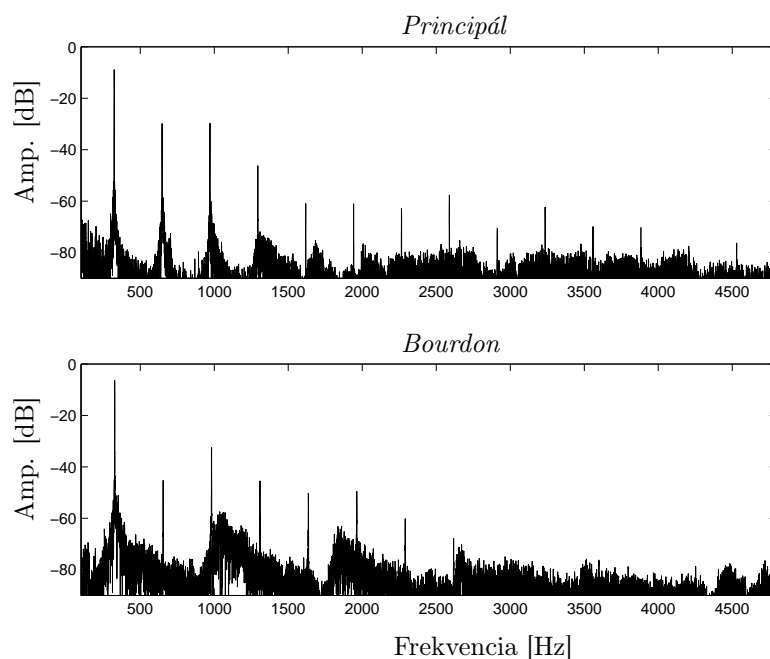
¹⁴Erre a szünetre a kiértékelő programnak van szüksége, az aktuális mérés jel-zaj viszonyának meghatározására.

A felvételek további feldolgozása utólag, off-line történt. Az 1. fejezetben részletezett pszichoakusztikai paraméterek hangfelvételből történő kinyerésére, illetve a 4. fejezetben bevezetésre kerülő jelmodell alapú szintézis paramétereinek meghatározására készült a `soundpar.m` MatLab program. Ebben a fejezetben a program hangmintákat feldolgozó részének eredményei kerülnek ismertetésre, ábrák formájában (a program belső működésének leírása az 56. oldalon, a 4.2. szakaszban található). A dolgozat terjedelmi korlátok miatt csak néhány ábrát ismertet, a kifejlesztett analizátor program azonban egy tetszőleges hangminta feldolgozása során a hozzá tartozó ábrákat megjeleníti, tehát más sípok – vagy akár más hangszerek – hasonló jellemzői könnyen előállíthatók (a program használatára az F.3.1. függelékben található egy példa).

2.3.2. Az állandósult spektrum

Az 1. fejezet a tárgyalt pszichoakusztikai jellemzők közül elsőként az állandósult spektrumot ismertette. Ennek megfelelően az elemző program is először a spektrumot számolja ki és ábrázolja.

Vizsgálva az orgonasípokot, megállapítható, hogy a sípok ebből a szempontból (is) karakteresek. A 2.5. ábrán látható egy nyitott fémsíp (*Principál*) és egy fedett fasíp (*Bourdon*) spektruma¹⁵.



2.5. ábra. *Principál* és *Bourdon* síp spektruma

A *Principál* síp több, mint 12 komponenssel rendelkezik, a *Bourdon*-nak csak az első 8 komponense jelentős. Általában is jellemző, hogy a fémsípek több, a fasípek – különösen a bőméretűek – kevesebb harmonikust tartalmaznak [Albert87].

¹⁵A megfelelő császári és naszályi regiszterek 64.wav fájljából előállítva.

Egy másik szembetűző jellemző az, hogy a *Bourdon* síp páros harmonikusai kisebb amplitúdójuak, mint a *Principálé*. Ennek fizikai magyarázata az, hogy a *Bourdon* regiszter fedett sípokból áll, a *Principál* pedig nyitottakból. A (2.1) és a (2.2) egyenletekből átrendezéssel könnyen kinyerhető, hogy – az alapharmonikus hullámhosszát λ_0 -al jelölve – a kialakuló lehetséges frekvenciák:

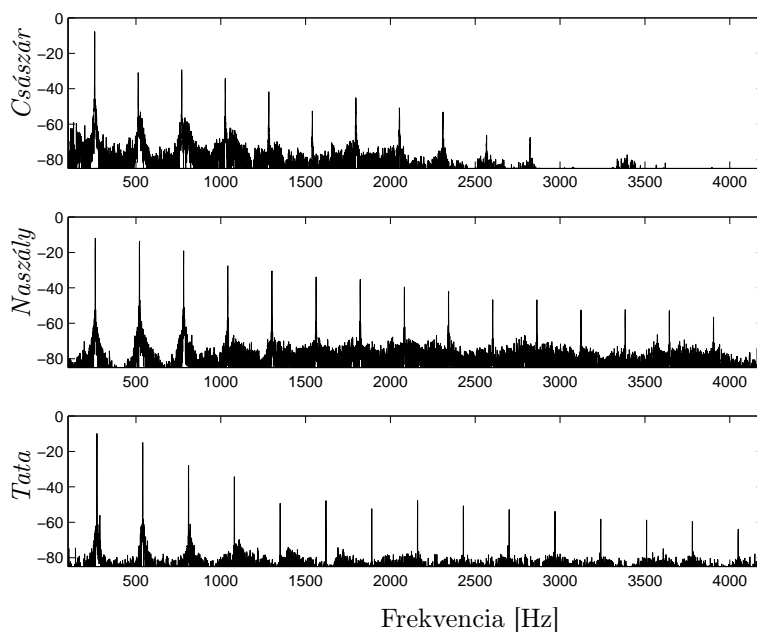
$$f_{ny,k} = \frac{c}{\lambda_n} = 2k \frac{c}{4l} = k \frac{c}{\lambda_0} \quad (2.5)$$

nyitott sípnál, illetve

$$f_{z,k} = \frac{c}{\lambda_n} = (2k - 1) \frac{c}{4l} = (2k - 1) \frac{c}{\lambda_0} \quad (2.6)$$

zárt sípnál, ahol c a hang terjedési sebessége levegőben. Elméletileg tehát, ideális, egyik végén lezárt sípban nem alakulhatnak ki páros felharmonikusok. A valódi lezárások (különösen nagyfrekvencián) nem ideálisak, de a fizikai jelleg így is látható.

A spektrumábrákon még egy további összetevő látható. Bizonyos harmonikusoknál, illetve a harmonikusok között zajos spektrumkiemelkedések, zajcsúcsok figyelhetők meg. Mivel ezek a komponensek a sztochasztikus jelenségek közé tartoznak, kialakulásuk elméleti magyarázata a 2.3.3. fejezetben található.

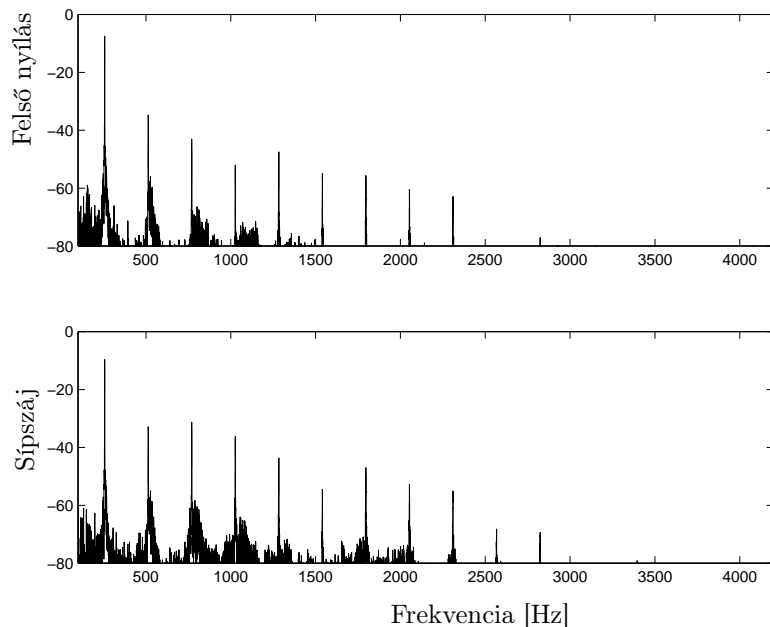


2.6. ábra. Három – azonos névleges frekvenciájú – *Principál* síp spektruma

Érdekesnek tűnik a három mért orgona ugyanazon c_4 *Principál*-sípjának¹⁶ egybevetése (2.6. ábra). A három síp anyaga, menzúrája ugyanaz, de három eltérő mester készítette őket. Jól látszik, hogy spektrumuk szerkezete hasonló, de az egyes

¹⁶A megfelelő könyvtárak 64.wav állománya.

komponensek között nagyobb eltérés is lehet (a császári *Principál* síp kifejezetten felhangszegény). Ha a sípok között a szórás nem nagy (lásd később), ez alapján – vagy még más jellegzetességek (pl. berezgés) alapján – azonosítható lenne egy-egy orgonakészítő¹⁷. Ez azt érzékelteti, hogy az emberi fül valóban összehasonlításos elven dönt egy hang karakteréről és – mérés technikai szempontból – elég nagy a „hibatűrése”, vagyis a szintéziskísérletek minősítésénél is megengedhető nagyobb szórás.



2.7. ábra. Egy *Principál* síp sugárzó nyílásainak spektrumai

A 2.7. ábra egy síp két sugárzó nyílásánál mért hang spektrumát ábrázolja. A két spektrum ugyanazon felvétel kimenete, a felvétel során a két mikrofon az ajak és a felső nyílás közelében volt elhelyezve. Az ábra – és az egész mérés – csak tájékoztató jellegű, mivel mindkét mikrofon mindkét nyílás jelét felvette, hiszen a két sugárzó nyílás közös akusztikai térben volt. Az látszik, hogy van eltérés a harmonikus komponensek között (olykor több, mint 10 dB), sőt, a zajtartalom is más (lásd a 2.3.3. fejezetben). A harmonikus komponensek sugárzási viszonyaira elméleti modell is felállítható, levezethető, hogy a páros felharmonikusokat a síp két nyílása azonos, a páratlanokat ellentétes fázisban sugározza, közel azonos teljesítménnyel [Angster90]. Igaz ugyan, hogy a fázisokra a fül érzéketlen, az ilyen, ún. dipólsugárzók esetében azonban a három dimenziós térben máshogy alakulnak az azonos fázisban sugárzó hullámok interferenciái, mint az ellentétes fázisúak kioltás- és erősítéshelyei. Amennyiben ezt a jelenséget a kétfülű (binaurális) hallás érzékeli, a szintézisnél is vizsgálendő. A feldolgozott irodalom a kérdéssel részleteiben nem foglalkozik.

Amint azt a regiszterek definíciójánál már láttuk, a frekvencia mentén a regiszterek sípjai mind építési, mind pedig hangparamétereiket tekintve változnak. Ennek a hangszín-változásnak az objektív vizsgálata azért fontos, mert így deríthető ki,

¹⁷Németországban folynak is ilyen kísérletek, lásd az [Angster96] irodalomban.

hogy a pszichoakusztikailag kiegyenlített hangzás érdekében hogyan kell változnia az orgonasípok felharmonikus-tartalmának, -arányának.

A 2.8. és a 2.9. ábrák ezeket a változásokat érzékeltetik. Mivel a különböző sípok felvétele közben a mikrofon-síp távolság változott, ezért az egyes sípok hangerőértékei nem mérvadóak. Az ábrákon ezért a felharmonikusok alapharmonikushoz képesti relatív amplitúdójának változása látható, az eltérést dB-ben jelölve. A frekvenciaskála a sípok sorszáma (MIDI-kódja) szerint változik, tehát az ábrázolás frekvenciatengelye is logaritmikus.

Ismert fizikai tény, hogy a magasabb alapfrekvenciákon a komponensek egyre „fogynak”, az energia egyre inkább a kisebb harmonikusokba tömörödik. Ez az ábrák léptékei miatt nem teljesen látszik, de teljesül, a változás mértéke azonban sípfüggő. *Principál* sípoknál (az alapharmonikushoz képest) az amplitúdócsökkenés mértéke nem túl jelentős, *Bourdon* regiszternél az eredetileg csak páratlan harmonikusokban lévő energia fokozatosan átáramlik az alapharmonikusba és az első felharmonikusba (elég jelentősen). Ez utóbbinál nagy frekvencián szinte csak az első két harmonikus amplitúdója számottevő (az alapharmonikus az ábrán nem látható). Ez azt jelenti, hogy ezeken a frekvenciákon a síp dugója (a „lezárás”) már egyáltalán nem modellezhető akusztikai lezárásként. Ennek az érdekes jelenségnek azonban sem említése, sem fizikai magyarázata nem található a feldolgozott orgona-irodalomban.

2.3.3. Sztochasztikus jelenségek

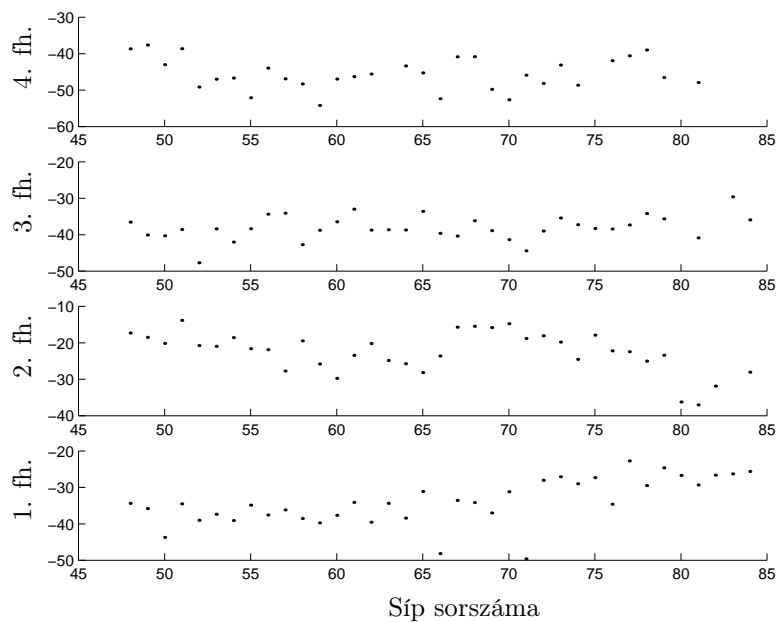
A pszichoakusztikai jelenségek tárgyalásánál (1. fejezet) a sztochasztikus jelenségek csak harmadikként kerültek sorra (1.3. fejezet). Az orgonasípoknál azonban ezen jelenségek hatása elég erős, valamint tranzienskor meghatározó szerepük van, ezért az orgonahangok jellemzésénél a tranziensek előtt kerül sorra ezen jelenségek tárgyalása.

Az orgonasípok esetében – amint arról már szó volt – állandósult állapotban az emberi beavatkozás, a vezérlés lehetősége csekély. A sípok sztochasztikus jellemzői tehát elsősorban a gerjesztés (levegőnyelv) statisztikus ingadozására és a gerjesztés-rezonátor kölcsönhatás instabilitására vezethetők vissza.

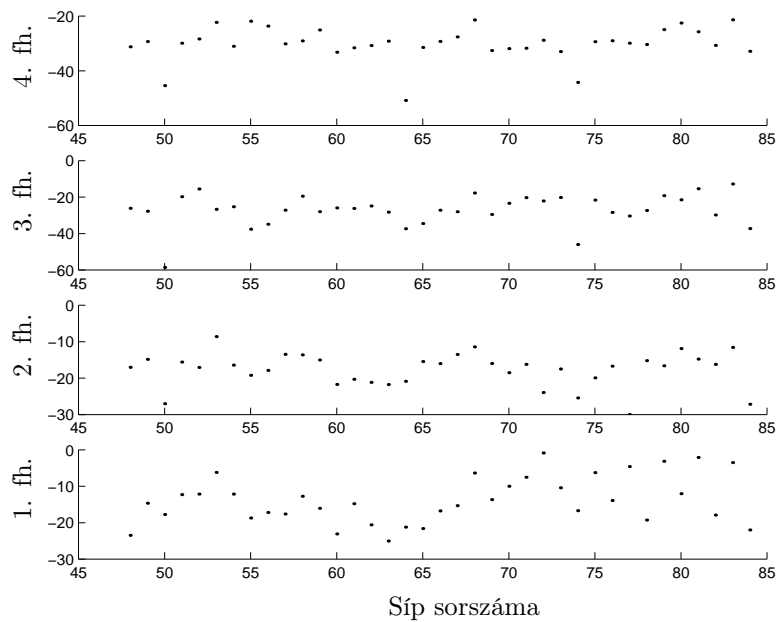
Az előző fejezet spektrumábráit vizsgálva (2.5–2.7.), jól láthatók a már említett zajcsúcsok a spektrumban. Az ábrákat tanulmányozva megállapítható, hogy kétféle zajcsúcs van, az egyik az, amelyik független a diszkrét spektrumvonalaktól, a másik pedig az, amelyik valamelyikkel szinkronban van. A 2.10. ábrán egy *Bourdon* sípnál megfigyelhető kétféle zajcsúcs látható kinagyítva.

A független zajcsúcsok biztos, hogy nem a harmonikus komponensek valamilyen transzformációs hibából eredő „melléktermékei”, mivel a spektrumot a lineáris Fourier-transzformáció segítségével állítja elő az analízis program. A diszkrét frekvenciakomponensekkel szinkronba lévő széles spektrumterjeszkedés jelenségről is könnyen belátható, hogy nem az ablakozás hatásaként jön létre, a használt ablak spektrumszivárgása sokkal kisebb.

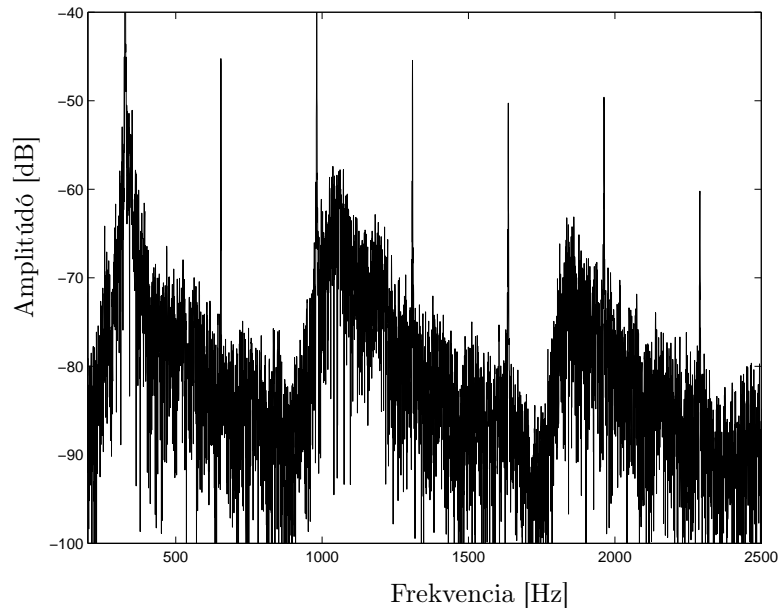
A szinkron csúcsok felfoghatók amplitúdómodulációnak, amint azt bizonyos szakirodalmak állítják [Angster90], ilyen tárgyalás esetén azonban külön kellene foglal-



2.8. ábra. A *Bourdon* regiszter sípjainak spektrum-változása



2.9. ábra. A *Principál* regiszter sípjainak spektrum-változása



2.10. ábra. *Bourdon* síp zaja

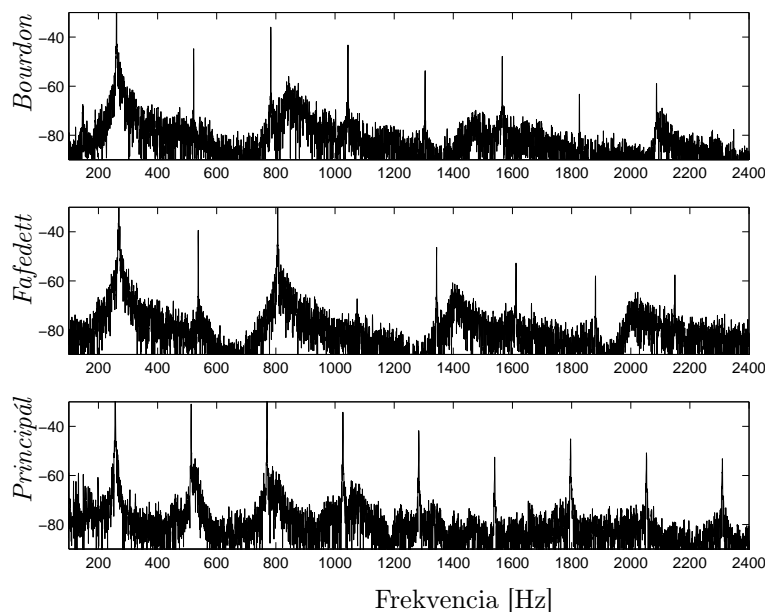
kozni azokkal a zajcsúcsokkal, amelyek az egyes harmonikus komponensek között alakulnak ki. Egységesebb elmélet is született a jelenség magyarázatára, mégpedig az, hogy a zajkomponensek – első közelítésben függetlenül a harmonikusoktól – az ékhang- vagy más néven peremhang-gerjesztés összetevői, „formánsai”¹⁸. A hangszernek tehát ez az ékhang a bemenőjele, amelyre a rezonátor „válaszol”, és így alakulnak ki a felharmonikusok [Angster90], [Albert87, I. rész]. Más mérések szerint ezek a zajcsúcsok nem függetlenek a harmonikusoktól, hanem dinamikus alakulnak ki. Ezek szerint önmagában a zajgenerátor-rész más zajcsúcsokat generálna, de sípként a rezonátor – megszólalása után – rákényszeríti rezgését a generátorra, és ennek során alakul ki (dinamikus visszacsatolással) az eredő spektrum. Állandósult állapotban a lineáris megközelítés (vagyis a zajkomponensek és a harmonikusok független, additív tárgyalása) elfogadható, mivel keverék (különbségi, összegjelek) nem alakulnak ki, a megszólalással kapcsolatos további megfontolások a következő fejezetben olvashatók.

Orgonasípoknál ezek a zajcsúcsok a síp „sípszerűségéért” felelősek. Ebben az az érdekes, hogy a zajcsúcsok viszonya a diszkrét harmonikus komponensekhez képest regiszterenként eltérő. A 2.11. ábra három azonos névleges frekvenciájú, de eltérő menzúrájú síp zajtartalmát mutatja¹⁹.

A naszályi *Bourdon* síp és a tatai *Fafedett* síp hasonló menzúrájú fedett fásípok. Zajspektrumuk szerkezete is hasonló, mindegyiknél négy domináns csúcs van a spektrumban. A *Bourdon* sípnál azonban az alap- és a nyolcadik harmonikussal van csatolásban a zajkomponens, a másiknál az első és a harmadik harmonikusnál

¹⁸Ez az elnevezés azért nem pontos, mert ezek a zajcsúcsok nem frekvenciafüggetlenek, az egyéb hangszereknél fellépő formánsok pedig azok.

¹⁹A megfelelő regiszterek 60.wav állománya alapján.



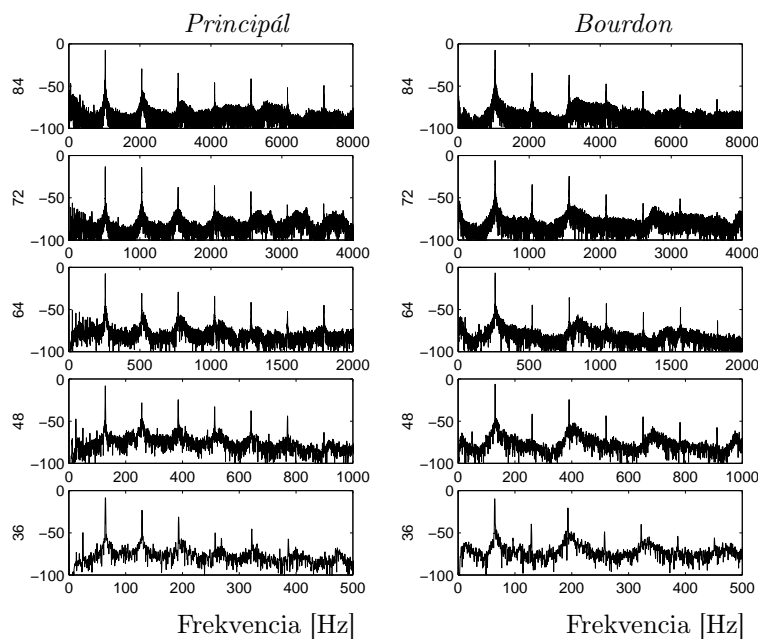
2.11. ábra. Azonos névleges frekvenciájú *Bourdon*, *Fafedett* és *Principál* síp zajos spektrumrészlete

jelenik meg szinkronizáció. Ezekhez képest a *Principál* (hengeres, nyitott fém-) síp teljesen eltérő jellegű. Egyrészt lényegesen kisebb a zajszintje, másrészt a kialakuló zajcsúcsok nem annyira jellegzetesek. Az látható, hogy szintén négy domináns csúcs van, azonban kétszer olyan sűrűn helyezkednek el. Ez nyilván a síp hosszával lehet összefüggésben (a kialakuló ékhang éppen ezért függ a cső hosszától is).

Az előző fejezetben, az állandósult állapot tárgyalásakor már bemutatásra került két olyan spektrumábra (2.7. ábra, 23. oldal), amelyen egy nyitott síp sugárzó nyílásainál elhelyezett két mikrofon jelének spektruma látható. Ott részletesen szó volt arról, hogy a két felvétel nem független egymástól, a közös akusztikai tér miatt, így ezek az ábrák bizonyos fenntartásokkal kezelendők. Jól látszik azonban, hogy a felső nyílás zajtartalma kisebb. Ezt a síp megszólalásának fizikai háttere is alátámasztja, miszerint a zajcsúcsok keletkezéséért leginkább az ékhang-generátor felelős, tehát zajtermelés csak az ajaknál jön létre. Független akusztikai térben (hangszigetelővel szétválasztva a két sugárzási teret a sípon kívül) valószínűleg a zajszint még tovább csökkenne a felső nyílásnál (teljesen nem szűnne meg, mivel a levegőnyelv a sípba befelé is termel zajt, nemcsak kifelé) [Angster90] [Verge95]. Alapkiindulásnak azonban elfogadható, hogy a síp zajtermelése csak az ajaknál lényeges.

A harmonikus komponensekhez hasonlóan a zajcsúcsok sem csak síptípusonként eltérőek, hanem az alapprofrendencia függvényében is változnak. A 2.12. ábra a zaj frekvenciafüggését ábrázolja, 4 *Bourdon* és 4 *Principál* síp spektrumának összevetésével. A frekvenciatengelyeken az alapprofrendenciával fordított arányban változnak a távolságok, így a spektrumkomponensek egymáshoz képesti frekvenciaaránya az ábrán azonos léptékű, tehát jól összehasonlítható.

A sípok paramétereinek az alapprofrendencia függvényében történő változása kétféle



2.12. ábra. *Bourdon* és *Principál* síp zajtermelésének frekvenciafüggése

lehet. Az egyik az egész regiszteren végigvonuló, tudatosan kialakított paraméterek függvénye, amely az azonos regiszterkaraktert, azonos hangzásérzetet okozza. Az előző szakaszban tárgyalt spektrumkomponensek változása egyértelműen ebbe a kategóriába tartozik. A sztochasztikus jelenségek szerepe azonban kettős [Albert87]. Egy részük ugyanúgy a regiszter hangképének kialakításáért felelős (ezek a tudatosan kialakított jellemzők), másik részük viszont síponként eltérő. Ez utóbbiak az egyes sípok karakterét, „egyéniességét” alakítják ki, és fizikai okuk a gyártás és beállítás pontatlansága. A jelenség pszichoakusztikai szempontból fontos, annak köszönhetően, hogy a hallás a változásokat kiemeli.

Ez utóbbi (egyéni) sípparaméterek vizsgálata nehéz, és csak a regiszter-jellemzők vizsgálata után nyerhetők ki az egyéb sípparaméterek közül. A 2.12. ábrán – mivel csak oktávonként egy síp látható – főként a regiszterfüggés látható.

Az egyik jellemző az, hogy a domináns zajcsúcsok harmonikusokhoz képesti elhelyezkedése nem változik, vagyis a csatolások ugyanúgy megmaradnak. Az egyes komponensek aránya sem nagyon változik, az ábrázolás léptéke miatt kisebb változások nem mutathatók ki (a sűrűség a léptékváltás miatt változik).

2.3.4. Tranziens folyamatok

A pszichoakusztikai jellemzők közül harmadikként az orgonasípok tranziens folyamatait vizsgáljuk. Ezek elemzése az 1.2. fejezetben ismertetett jelfeldolgozási korlátok miatt nem egyszerű. Például ha egy normál síp megszólalása 100 ms, és 5 lépésben szeretnénk megnézni a spektrumot, akkor az időtartománybeli ablak 20 ms, a frekvenciafelbontás ennek reciproka, azaz 50 Hz. Ha a síp alaphangfrekvenciája

nem túl nagy (100 Hz-es nagyságrendű), a kapott eredmény rendkívül pontatlan. A pontosság növelésére több eljárás is alkalmazható.

Az egyik lehetséges módszer a felbontás javítására spektrogram készítése lehet átlapolódó futóablakos FFT alkalmazásával. Egy másik lehetséges módszer a jel együttes idő- és frekvencia-függésének ábrázolása valamilyen transzformáció segítségével. Ilyen jelfeldolgozási eszköz a Wigner-eloszlás (Wigner-disztribúció), illetve a Cumulative Attack és Decay Spectrum meghatározására szolgáló eljárások. Ez utóbbi kettő végeredményben a futóablakos FFT alkalmazása speciális bemenő jelek esetén [Koller91], a Wigner-disztribúció pedig – mivel nemlineáris transzformáció – az egyes harmonikusok között interferenciákat hoz létre, amelyek az eredeti hangban nincsenek benne, szűrni kell őket.

Az ismertetett jelfeldolgozási elemek bemenő jeltől függetlenül azonos pontosságot érnek el, a jelről nem írnak elő semmilyen „extra” felépítést. Az orgonasípok – illetve minden állandó gerjesztésű hangszer – esetén azonban ismerjük a jel szerkezetét. Eszerint az apriori információ szerint ezeknek a hangszereknek a hangképe vonalas – ezen belül harmonikus – szerkezetű, esetleg némi „maradékjellel” (zajjal, egy-két nemharmonikus komponenssel) kiegészítve. Ez a megközelítés persze feltételezi, hogy a jel szerkezete nem csak állandósult állapotban, hanem a kezdeti berezgési (és lecsengési) folyamat során is ilyen marad. Ily módon külön tárgyalhatók az egyes felharmonikusok és a maradékjel tranziens jellemzői, vagyis ez egy lineáris megközelítés.

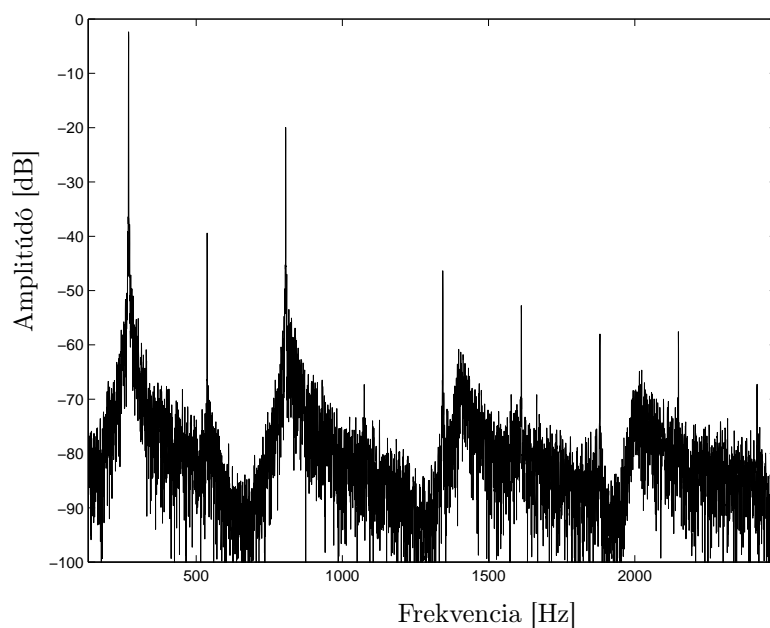
A harmonikusonkénti független vizsgálati módszer akkor használható, ha az orgonasíp megszólalása is ilyen. Képzett zenészek és orgonaépítők szerint az orgonasípok ilyen jellemzője regiszterfüggő [Angster90]. Bizonyos sípok megszólalása akkor jó, ha – egy rövid zajjelenség után – mindegyik felharmonikus egyenletesen éri el a maximális amplitúdóját. Más sípok akkor megfelelőek, ha a síp először egy magasabb frekvencián szólal meg, majd az energia fokozatosan áramlik át az alapharmonikus komponensbe²⁰. Ráadásul a síp magasabb megszólalási frekvenciája nem is a később kialakuló alapharmonikus frekvenciájának többszöröse, hanem valamelyik harmonikus-frekvenciánál kicsit nagyobb [Albert87, I. rész].

Az orgonasíp megszólalásának fizikai modelljét (ezen belül a fenti jelenség modelljét) a szakirodalom már régóta tárgyalja. A jelenség – amely turbulens áramlasként ugyan leírható a Navier–Stokes-egyenlet segítségével [Lajos98] – nemlineáris, mivel egy egyenletesen áramló levegőnyelv alakul át periódikus rezgéssé. Az elméleti fizikai modell és a mérések szerint a megszólalás a következő: Először a beáramló levegő nekiütközik a síp felső ajkának, és oszcillálni kezd, zenei hangot ad (ékhang jön létre). Az így kialakuló rezgés okozza a zajt és benne a már elemzett zajcsúcsokat. Ezzel gerjesztve a síp rezonátorát (a síptestet), a síptest válasza lesz a harmonikusok berezgése. Amelyik harmonikushoz közel van egy zajcsúcs, hamarabb berezeg, mint a többi. A „köpködés” pedig úgy jöhet létre, hogy ilyenkor a kialakuló ékhang zajcsúcsa közel van valamelyik harmonikushoz, a síp berezeg ezen a frekvencián, majd a rezgés frekvenciája beáll az adott felharmonikuséra, a hang „kitisztul”, mi-

²⁰Az orgonairodalomban ezt a jelenséget úgy hívják, hogy a sípok köpködően (németül *spuckende*) szólalnak meg.

közben az ékhang adott komponense elhalkul. Amennyiben a gerjesztőjel kiemelt frekvenciái nagyon eltérnek a cső harmonikus frekvenciáitól, a megszólalási folyamat hosszú időt vesz igénybe, a síp nehezen rezeg be. Ha a gerjesztőjel valamelyik csúcsa az egyik harmonikkal pontosan egybeesik, a síphang gyorsan felépül²¹. A gerjesztőjel rezonátorhoz való viszonyát a síp gyártásakor, az intonálás során állítják be [Angster90].

Az elmélet alátámasztására a 2.13–2.15. ábrák szolgálnak²². A spektrumábrán jól látszik, hogy a sípnak²³ az 1. és 3. harmonikusa jelentős, valamint négy domináns zajcsúcs van, a két mélyebb szinkronban az első és harmadik diszkrét spektrumkomponenssel, a két magasabb pedig az ötödik és hetedik komponens felett.



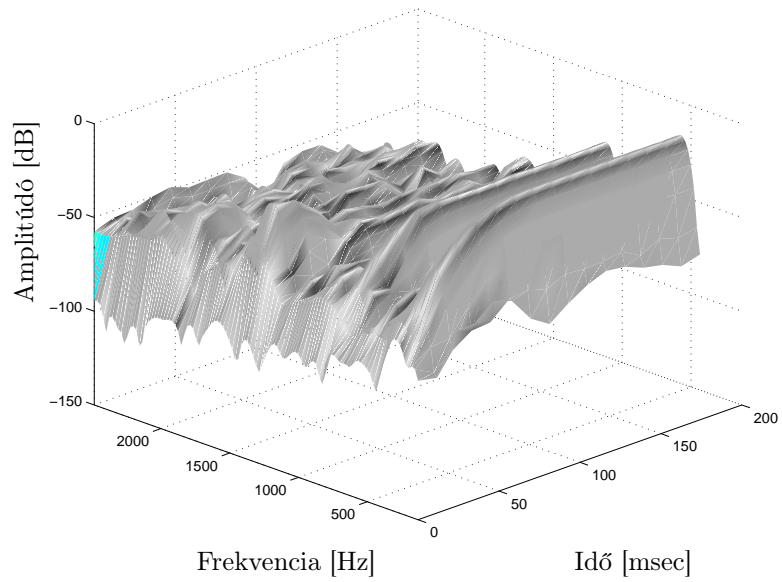
2.13. ábra. Egy fedett fasíp állandósult spektruma

Az elmélet szerint tehát a zaj szólal meg először (annak is főként a nagyobb frekvenciás komponensei), majd a szinkron komponensek alakulnak ki. Ezután a felsőbb zajkomponensek fokozatosan elhálnak, miközben az energia a felsőbb harmonikusokba áramlik át. A jelenség nyomkövethető a 2.14. ábrán, amely a síp spektrogramját ábrázolja. Látható a két nemharmonikus zajkomponens nagy amplitúdója (főleg az 5. harmonikusa felett lévők), a szinkron komponensek „sima” felfutása, és a magasabb komponensek végig zajos megszólalása. A domináns amplitúdók, illetve a frekvenciaváltozások kiemelését mutatja a 2.15. ábra. Ezen ábrák alapján jogos az a következtetés, hogy a frekvenciakomponensek nem változnak jelentősen

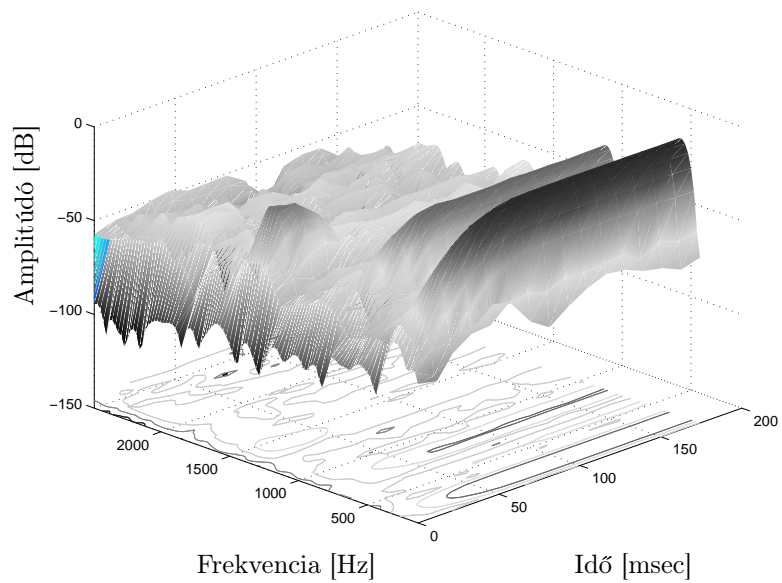
²¹Az optimális egyensúlyi hangzás koronként változott. A barokk orgonák lassabban szólalnak meg, a romantikus orgonáknál azonnali megszólalásra állították a sípokat. Ez lehet tehát az a fizikai jellemző, amely alapján az orgonisták el tudják dönteni egy orgonasíp gyártásának körülbelüli időpontját.

²²Az ábrákat a CD-n is megtalálható wfall.m állítja elő, amelyet a soundpar.m program hív meg.

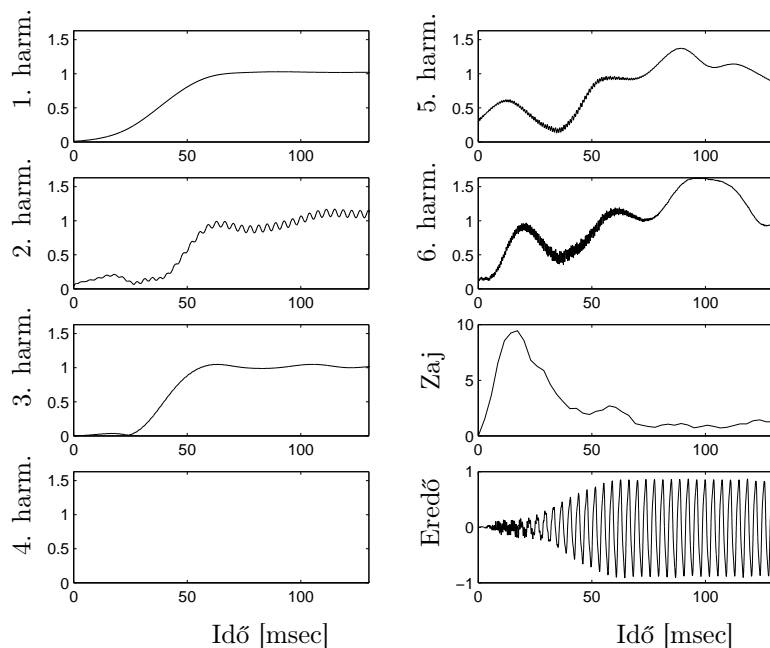
²³Tata, 8'-as *Fafedett* regiszter, 60.wav sípminta.



2.14. ábra. A fedett fasíp berezgése I.



2.15. ábra. A fedett fasíp berezgése II.



2.16. ábra. A fedett síp harmonikusonkénti berezgése, a zajtartalom változása és a síp berezgése

a tranzienst alatt, csak a sípzaj és a harmonikusok aránya, illetve a sípzajon belüli amplitúdóarányok módosulnak, vagyis a rendszer jó közelítéssel lineáris.

Jogos tehát a felharmonikusonként és maradékjelként történő független vizsgálat. Ennek a tárgyalási módszernek ráadásul több olyan előnye is van, ami miatt végül az analízis program is ezt alkalmazza. Egyrészt a harmonikusokra illesztett szűrő segítségével a frekvenciaszelektivitás jó lehet, másrészt a kimenet időtartománybeli, „kézzelfogható”. A módszer könnyen megvalósítható pl. MatLab-bal, ráadásul – és ez a döntő – illeszkedik a 4.1.3. fejezetben bevezetett jelmodell koncepciójához, vagyis az így kapott jelek paraméterei könnyen transzformálhatók a jelmodell alapú szintézis paramétereivé (lásd a 4.2.2. fejezetet).

A felharmonikusokat a kifejlesztett MatLab-program FIR-szűrők segítségével nyeri ki az eredeti jelből. Az algoritmus részletes működését a 4.2. fejezet tárgyalja, itt csak az analízis eredményei szerepelnek. Egy ilyen eredmény látható a 2.16. ábrán. A már említett tatai fedett fasíp felharmonikusainak amplitúdó-burkolói, a maradékjel effektív értékének változása és a teljes berezgés felvétele látható az egyes részábrákon (a negyedik harmonikus az algoritmus túl zajosnak találta, ezért nem is határozta meg burkolóját (vö. a 2.13. ábrával)). Jól érzékelhető, hogy a felharmonikusonkénti vizsgálat lényegesen informatívabb, mint a felvétel, amelyről csak az látszik, hogy valamilyen zajos, nagyobb frekvencián kezd megszólalni a síp. Az ábrán a megszólalás első 130 ezredmásodperce szerepel, normalizált amplitúdókkal, a jó láthatóság érdekében.

Megfigyelhető, hogy – az elméletnek megfelelően – először a zaj szólal meg (az 5. és 6. komponensnél látszó kezdeti berezgések is valószínű, hogy a zajtól szár-

maznak, hiszen a komponensek amplitúdója elég kicsi, összemérhető a zajjal), majd utána kapcsolódnak be a harmonikusok. A „legszebb” felfutást az a két harmonikus mutatja, amelyik a zajjal csatolásban van. A nagyobb harmonikusok erősen zajjal terhelték (annak ellenére, hogy a relatív sáv szélesség sokkal kisebb), berezgésük nehezen értelmezhető.

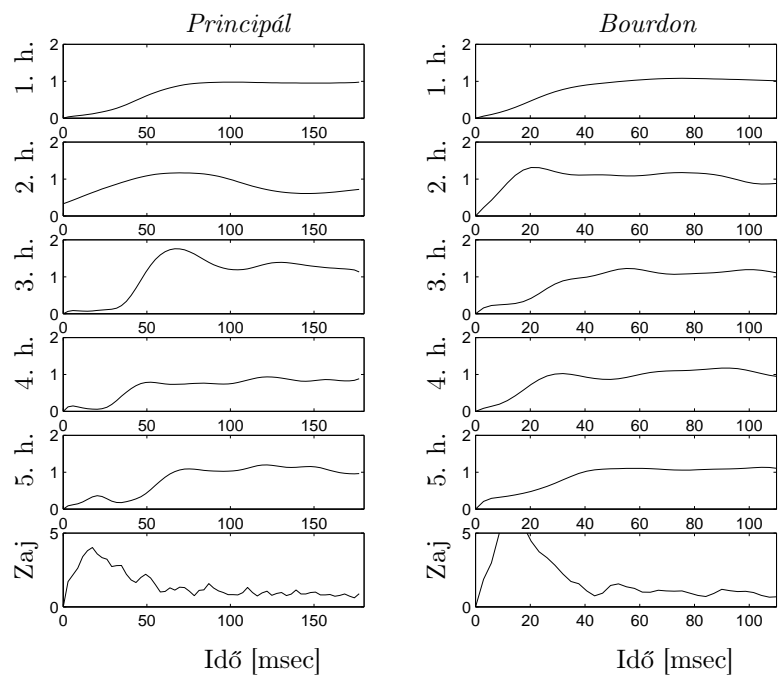
A 2.17. ábra egy *Principál* és egy *Bourdon* síp²⁴ felharmonikusainak berezgését és zajtartalmának változását mutatja. Összevetve őket a 2.5. ábrán látható spektrumokkal, látható, hogy itt is igazak az előbb kifejtett elméleti állítások, miszerint a zajkomponens kezd, majd a csatolásban lévő harmonikusok alakulnak ki először, majd úgy a többi. Az is megállapítható, hogy a tranziensek is jellemzőek a regiszterekre. A *Principál* sípban a 2. harmonikus túllövésével indul, a zajjal együtt, a *Bourdon* sípban túllövés nem domináns, ellenben a zaj erős.

Amint az előző szakaszokban már láttuk, az orgonasípek jellemzői nem csak regiszterenként változnak, hanem regiszteren belül is, az alaphérfrekvencia függvényében. A tranziensek is jellegzetes változásokat mutatnak a hérfrekvenciaskála mentén. A hangszerekre általában jellemző, hogy a magasabb alaphérfrekvenciájú hangok gyorsabban szólalnak meg, hamarabb érik el állandósult állapotukat. Orgonasípknál is fennáll ugyanez a jelenség, a legmélyebb sípek hallhatóan sokáig „huhognak”, míg a magasabbaknál nem is érzékelhető tudatosan a megszólalás [Albert87]. A felharmonikusok berezgésének változása azonban – az egyedi gyártású sípek miatt – hangról hangra nem mutat egyértelmű változást. Ritkábban vizsgálva a sípeket, oktávonként már látszik némi jellegzetesség, de műszaki leírhatósága nem kivitelezhető megfelelő igényességgel.

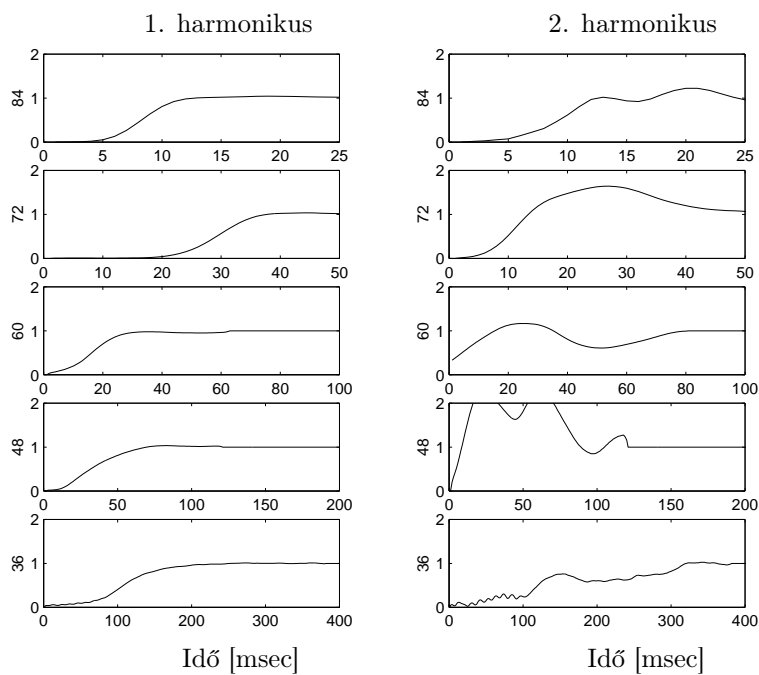
A 4.2.2. fejezet (57. oldal) által bevezetett burkoló-leíró eljárás rendkívül képszerű – ugyanakkor objektív – megadást ismertet, ezért a sípek tranziensének hérfrekvenciafüggéséről részletesen ott lesz szó. Itt a tendenciák érzékeltetésére azért bemutatásra kerül egy ábra, amely a császári *Principál* regiszter első két harmonikusának változását érzékelteti. A regiszter legjellemzőbb tulajdonsága, a második harmonikus túllövése megmarad (a legmélyebb sípnál nem jelentkezik, az fából van, míg a többi fémből), a magasabb hangoknál kicsit csökken. Ezen kívül az is látszik, hogy a nagyobb alaphérfrekvenciájú sípek valóban gyorsabban épülnek fel (a sípek felfutása az ábrán azonos, miközben az időlépték mindig felére csökken), ez főleg az alapharmonikusnál figyelhető meg. *Bourdon* sípekre hasonló megállapítások tehetők, azokról és még más regiszterekről a már említett fejezetben található összefoglalás.

A tranziensek tárgyalásának végén a sípeknak még egy tulajdonságát meg kell említeni. Az első fejezetben már volt arról szó, hogy a hallás a változás, a változatoság jelenlétére, illetve hiányára érzékeny, a változásokat kiemeli. A szakirodalom szerint az orgonasíp egyik szépsége az, hogy mindig máshogyan szólal meg, ennek hiányában – pl. egy modell esetében – a síphang „egyhangúvá” válik [Tarnóczy82]. Ennek a vizsgálatához egy síp több felvételét kell összevetni. Készült is több felvétel ugyanarról a sípról, mind a tatai, mind a császári orgonánál, de mivel az így kapott burkolók szemre nem mutatnak eltérést, ezért ezt az elemzést is a 4.2.2. fejezet ismerteti részletesebben.

²⁴A császári és naszályi orgonából, a megfelelő regiszterek 64.wav fájljából előállítva.



2.17. ábra. *Principál* és *Bourdon* síp berezgése és zajtartalom-változása



2.18. ábra. *Principál* síp berezgésének alapfrekvencia-függése

2.3.5. Külső körülmények

Az 1.4. fejezetben került sorra a pszichoakusztikai paraméterek közül a külső hatások vizsgálata, amelyek között több, kifejezetten orgonára érvényes jellemző is található. Az is megállapítást nyert, miszerint a külső hatások olyan paraméterek, amelyek sípok közeltéri felvételei alapján nem vizsgálhatók.

A csatolási jelenségek közül az akusztikai csatolás, vagyis a lebegések kialakulása visszavezethető a sípok egyéni hangjára, egyéni karakterisztikájára. Ily módon a jelenség a sztochasztikus ingadozások és a sípzaj paramétereivel jól leírható, sőt, ezek megléte esetén automatikusan kialakul. A *Mitnahme*-effektus fizikailag más természetű, csak két elhangolt síp egyszerre történő megszólása esetén jöhet létre. Mivel ritkán észlelhető (speciális mérési körülmények között, illetve speciális regiszterkombinációk esetén), és az orgonahangnak – bár kétségtelenül érdekes de – nem a legjellegzetesebb tényezője, ezért a szintéziskísérletek vizsgálatához nem feltétlenül szükséges.

Az orgonahang hangját egyik legnagyobb mértékben befolyásoló külső hatás a hangszer magába foglaló terem utánzengése. Ez természetesen nem a hangszer paramétereinek függvénye, hanem a helyszíné. A terem utánzengésének méréséről és elméleti számításaikról több irodalom áll rendelkezésre az érdeklődőknek, egy jó kiindulási alap a [Tarnóczy86]. Azoknak a templomoknak, amelyekben a felvételek készültek, általános jellemzőjük, hogy nem túl nagyok, tégelából készültek, sok fa (padok, karzat) található bennük, tehát „szárazon” szólnak. Éppen ezért, a sípoknak elég sok olyan jellemzője is hallható az orgonától nagyobb távolságban is (10-20 méterre), amely egy kőből készült, nagyobb templomban a teremreflexiók miatt elnyelődik²⁵. Az orgonahang-szintézisek vizsgálatánál a teremhatás úgy vehető figyelembe, hogy az adott szintetizátorokat egy nagyobb teremben, az orgonánál megismert körülmények között hallgatjuk meg (esetleg a termet zengetővel modellezve). Az azonban mindenképp igaz, hogy egy jó orgonasípszintézisnek teremzengés nélkül is sípszerű hangot kell generálnia. Ez főként az orgonisták igényeit kielégíteni szándékozó szintézis esetén szükséges, mivel ők – azon kívül, hogy a sípok közelében játszanak az orgonán – sokszor járnak az orgona belsejében is (hangoláskor, kisebb javításkor), így jól ismerik a sípok közeltéri hangját, tehát egy modelltől is elvárják ezt.

A hangforrások térbeli elrendezése az utolsó körülmény, amelyet ez a fejezet tárgyal. Az orgonasípok elrendezése az orgonában – a már részletezett mátrixstruktúrán túl – egészen speciális, egyrészt esztétikai, másrészt akusztikai szempontok figyelembevételével alakítják ki.

A nagyobb orgonákat ún. *művekre* (*Werke*) osztják. Egy-egy manuálhoz (illetve a pedálhoz) tartozik egy-egy mű, benne egy szelládával, amelyen megtalálhatók az összes, adott billentyűzethez tartozó regiszterek sípjai. A művek térben általában szellősen helyezkednek el, egymástól nagyobb távolságban. Tipikus művek a *főmű*, *mellmű*, *felsőmű*, *hátpozitív* és a *pedálmű*. Általában a műveket szimmetrikusan helyezik el, nagyobb orgonákban a pedálművet ketté is bontják, és az orgona két szélén

²⁵Ez jól hallható a CD-n található audió anyagon is.

helyezik el (ezeket hívják pedáltornyoknak), míg kisebbeknél a művek szorosabban helyezkednek el, a pedálsípok általában az orgonaszekrény hátsó részébe helyezik (ilyen a császári orgona is, lásd a F.1. függelékben) [Klotz72].

A műveken belül a sípok sorrendje is jellegzetes. A homlokzat mögött az orgonaházban elhelyezett, kívülről nem látható sípok rendező elve az alapfrekvencia, de nem egyszerűen növekvő vagy csökkenő sorrendben. A sípok alapfrekvenciájuk szerint először két csoportra osztják, úgy, hogy minden második síp kerül egy csoportba. Így alakul ki a C- és Cisz-oldal, amely a zenei skála két egymást követő hangjáról kapta nevét. Egy oktávból (amely 12 hangból áll) tehát 6-6 síp kerül egy-egy oldalra, rendre a *C, D, E, Fisz, Gisz, Aisz*, illetve a *Cisz, Disz, F, G, A* és *H* hang. Az eképpen szétválasztott hangokat nagyság szerint sorba rendezik, és így helyezik el az orgonában. Mivel egy regisztert általában egy vonal mentén helyeznek el, ezért attól függően, hogy a sípok az alapfrekvencia függvényében középről kifelé vagy fordított irányban építik be az orgonaházba, a sípok teteje összességében \wedge vagy \vee formát vesz fel. Az elrendezés a mért orgonák belsejének fényképein jól látható, és könnyen megérthető (lásd az F.1. függelékben). Nagyobb orgonáknál a már említett pedáltornyok sípjait is a C- és Cisz-oldal szerint rendezik el [Fletcher91].

Ennek a belső „széthúzásnak” az orgona belső áttekinthetőségének növelésén kívül akusztikai szerepe is van. Különösen a mély frekvenciákon fordulhat elő az, hogy két, egymáshoz közeli frekvenciájú síp térben is egymás mellé helyezve és egyszerre megszólaltatva kellemetlen lebegések, esetleg részleges kioltás jön létre. Egymástól távol helyezve őket (pedáltornyok esetén külön orgonaház-részben) a jelenség nem észlelhető, az orgonaházban és a teremben létrejövő reflexiók miatt²⁶.

Az orgona homlokzatába – az ún. *Prospekt*be – helyezett sípok sorrendjét elsősorban esztétikai szempontok határozzák meg, bár ott is rendező elv az imént ismertett C-, Cisz-oldal rendszerű tagolás.

Az ily módon létrehozott rendszeren kromatikus skálát játszva könnyen észrevehető, hogy az orgonasípok valóban „térben” szólnak, és a rendező elv szerint a hangforrások közelednek, vagy távolodnak egymástól. Különösen az orgona közép-vonalában elhelyezett játszóasztalánál érzékelhető ez a jelenség. Egyszerre szóló regiszterek esetén még az is észlelhető (főként kislekvencián), hogy melyik síp van messzebb, vagyis hátrébb az orgonában. Ennek fizikai magyarázata az irányhallással van összefüggésben, amelynek tárgyalása azonban meghaladja a dolgozat kereteit [Tarnóczy82].

Ezek a jelenségek tehát mind hozzájárulnak az orgona eredő hangjához, tehát az egyes orgonaművészi igényeket is kielégítő orgonamodelleknél is vizsgálandóak.

²⁶További javítási módszer az, hogy a C- és Cisz oldalon belül az egymás mellé kerülő sípok egymásnak háttal helyezik el, így egy síp két, azonos irányba sugárzó szomszédja már egy nagy terccel (frekvenciaarányban $\sqrt[3]{2}$ -szeresen) „odébb” szól, tehát lényegesen távolabb, mintha csak a lineáris rendezés esetén fellépő $\sqrt[12]{2}$ (kisszekund) lenne a szomszédos frekvenciaarány.

3. fejezet

A létező modellek

Az orgonahang népszerűsége, ugyanakkor a hangot előállító orgona előállítási, fenntartási költségének nagysága miatt az orgonaépítészet fejlődésével párhuzamosan mindig kísérleteztek az orgonasíphoz hasonló hang egyszerűbb, gazdaságosabb előállításával.

Az egyik ilyen megoldás az ún. multiplex orgona, amelynek lényege, hogy egy sípot több regiszterben is használnak. Ilyen rendszerben pl. egy közepes frekvenciájú *Principál* síp tagja mind a *Principál 8'*, *Principál 4'*, *Quint 22/3'* és a *Principál 2'* regisztereknek. Ilyen megoldás esetén a sípok nagyrésze megtakarítható, ezt a fajta orgonát azonban több okból sem szeretik az orgonaművészek. Egyrészt sokregiszteres játék esetén az orgona hangja nem lesz elég telt, másrészt pedig – mivel egy síp sok regiszter tagja – a sípok karaktere, az egyes regiszterek egyénisége elvész.

Egy másik, szintén elsősorban orgona kiváltására létrehozott akusztikus hangszer a harmónium, amelynek hangképzése – egy-két kivételtől eltekintve – eltér az orgonáétól. Az áramló levegő ugyanis nem sípokat, hanem fémmylveket rezget meg, a keletkező hang pedig rezonátor vagy síptest nélkül, közvetlenül kerül kicsatolásra. A harmónium hangja valamennyire hasonlít a nyelvsípok hangjára, az orgonában megszokott ajaksíp-regiszterek légyságát nem tudja előállítani.

Az aktív elektronika fejlődése és a vele párhuzamosan meginduló elektroakusztikai kutatások eredményei alapján – az akusztikus hangszerek versenytársaiként – jelentek meg az első olyan „orgonaszerű” hangzást előállító hangszerek, amelyek nem légbefúvásos gerjesztéssel működtek. Ha hangjuk nem is mindig, de kis méretük és gazdaságos előállításuk mindenképp konkurenciát jelentett/jelent a klasszikus sípos orgonáknak.

3.1. Hammond-orgona

Az első modell, amely kifejezetten az orgonahang reprodukálását tűzte ki célul, a Hammond-orgona volt, amelyre Laurens Hammond, az orgona feltalálója 1934-ben nyújtott be szabadalmat az Egyesült Államokban. A hangszer fényes karriert futott

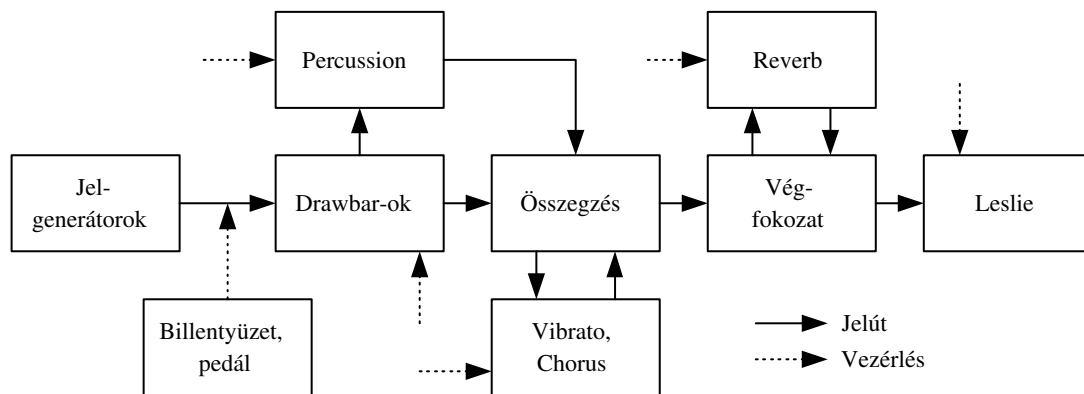
be, különösen Észak-Amerikában. Jelenleg már nem gyártják, a '70-es évek elején készült el az utolsó¹.

3.1.1. A szintézis alapelve

A hangszer működésének alapelve az additív (vagy más néven Fourier-) szintézis, amely a periodikus jelet véges Fourier-sorával, különböző amplitúdójú szinuszfüggvények összegjelével közelíti. Az így előállított hangot különböző funkcionális egységeken (effekteken²) keresztül módosítva, a kialakult hang erősítés után egy hangszórón keresztül hallhatóvá tehető.

3.1.2. Funkcionális egységek

A Hammond-orgona egyes egységei az additív szintézis alapelve felépítve, egy komplex rendszert alkotnak. Az orgona blokkvázlata [A100 Man] a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra. A Hammond-orgona blokkvázlata

Az orgona hangját előállító egység műszaki szempontból nagyon érdekes, jól tükrözi az adott kor technikai lehetőségeit. A hanggenerátor elektromechanikus, a szintézishez szükséges szinusz-jeleket állítja elő. A jel előállítását 91 darab, szinusz-profilú(!) állandó mágneses térben forgó ferrit alapú „fogaskerék” (*Tone Wheel*) végzi [Sík92]. A hangszerben egyetlen forgató motor van, a 91 eltérő frekvenciájú szinuszt a hangkerekek fogainak számával, illetve forgási sebességével (áttételekkel) állítják elő. Az ily módon létrehozott váltakozó mágneses mezőket független tekercsek segítségével alakítják át elektromossá. A jeltisztaság növelése érdekében mindegyik

¹Népszerűsége miatt azonban rengeteg mintavételezéses szintetizátor tartalmazza a hangját, sőt, vannak olyanok is, amelyekben csak Hammond-hangszín van, ezek a „digitális Hammondok”.

²Az effekt a hangmérnöki szakmában elterjedt kifejezés, gyűjtőneve az összes olyan készüléknek, illetve részegységnek, amely egy már meglévő hang paramétereit módosítja (beletartoznak a zengetők, visszhangosítók, hangszínmódosítók, stb.).

hangkerékhez még tartozik egy hangolt LC-szűrő [A100 Man]. Végül a jelgenerátorok kimenetét – egy beiktatott soros ellenállással – áramgenerátossá alakítják.³

Az így előállított szinuszjelek oly módon vannak a billentyűzet egyes elemeihez rendelve, hogy egy billentyű a hangmagasságához tartozó első 9 harmonikus komponenszt engedélyezze. A billentyűzetek alatt ennek megfelelően 9 sín található, amely a megfelelő harmonikusokat összegzi, több hang lenyomásakor tehát rendre létrejön az 1., 2., ..., 9. harmonikusokból álló összegjel.

Az így kialakuló kilenc jel aránya állítható, az ún. *Drawbar*-ok segítségével. Így lehet a felharmonikustartalmat – az összes frekvencián egyszerre – módosítani, ezáltal különféle hangszínek érhetőek el (lágy, fényes, stb.). Az ily módon súlyozott komponenseket egy hangfrekvenciás transzformátor összegzi, majd – az elektroncsöves erősítőkön keresztül – az összegjel kikerül a hangszóróra⁴.

Az orgona hangját számtalan beépített effekttel lehet befolyásolni, ezáltal segítve olyan jellemzők kialakítását, amelyek a klasszikus orgona hangjában is fellelhető hasonló jelenségeket próbálják modellezni.

A *Vibrato* effekt – elektromechanikus eszköz segítségével – bizonyos határok között változtatható modulációs mélységű, de állandó frekvenciájú frekvenciamodulációt okoz az eredő jelben. A *Chorus* effekt ehhez hasonló, de az így kapott modulált jelhez még hozzáadja az eredeti, modulálatlan jelet, így egy érdekes lebegés alakul ki a hangban, amely a kóruszerű, telt hangzást okozza.

A végerősítőhöz tartozó *Reverb* egység feladata mesterséges zengés keltése a teremhatás modellezésére, illetve a hangzás összetettségének fokozására. Erre ún. rugós zengetőt használtak. A zengető azon az elven működik, hogy egy rugalmas fémet (rugót) lazán felfüggesztve, majd egyik végén valamilyen elektromechanikus átalakítóval hangfrekvencián meggerjesztve a rugón a hang terjedni kezd, és ha az akusztikai lezárások a felfüggesztéseknél nem egyeznek meg a rugó hullámimpedanciájával, visszaverődik. A rugó rezgése egy további elektromechanikus átalakítóval alakítható vissza elektromos jellé. Több csatolt rugóval a visszaverődések száma hatványozódik, végeredményben n rugó esetén n egydimenziós „térérzet” jön létre [Takács98].

A *Percussion* egység viszonylag későn, 1955-ben került bele az orgonába, feladata a tranziens jelenségek módosítása. Használatával egyetlen hang lenyomása esetén – megszólalási tranziensként – a billentyűhöz tartozó első felharmonikus (oktáv) és/vagy második felharmonikus (duodecima) amplitúdója egy kapacitásvezérelt erősítőn keresztül rövid időre megnövekszik. Az orgona vezérlési rendszertechnikája miatt ez a hatás csak az első hang lenyomásakor működik, vagyis egy már szóló hang mellett a következő billentyű már nem triggereli a tranziens-erősítőt [H. FAQ].

³A '30-as években már ismerték a tisztán elektromos hangfrekvenciás oszcillátorokat is, ilyen nagy mennyiségben, a megfelelő pontosságban előállítani (és a szükséges elektroncsöveket fűteni) még nem volt gazdaságos.

⁴Furcsa, hogy a hangszer először külön a felharmonikusokat összegzi, majd utána alakítja ki az eredő jelet. A többszólamú akusztikus hangszerekben a jelenség fordított, vagyis először alakul ki mindegyik hang, önálló felhangstruktúrával, majd utána adódik össze. A Hammond-orgonában alkalmazott megoldás előnye az, hogy így kevés generátor kell a megvalósításhoz, továbbá a billentyűzet és a hangszínmódosító *Drawbar*-ok rendszertechnikája egyaránt egyszerű.

A Hammond-orgonáknak van még egy olyan eleme, amely erősen befolyásolja hangjukat, ez a hangot lesugárzó hangszóró. A megszólaltatandó hangot ugyanis nem egy egyszerű többutas hangszórórendszer sugározza le, hanem egy olyan, amelyben a magassugárzó felett egy tölcser, a mélysugárzó alatt pedig egy hangvető eltérő sebességgel forog. A keletkező hanghatás elég összetett, összefoglaló nevén *Leslie*-effektusnak hívják. A hallgató felé közeledő és távolodó hangforrás miatt kialakul a Doppler-effektus, amely frekvenciamodulációt okoz a jelben. A hangsugárzó irányítottága miatt amplitúdó-moduláció is fellép, ugyanez az oka a jelben fellépő periodikus hangszínváltozásnak is. A két eltérő sebességgel forgó, állandóan változó irányú gerjesztés megnöveli a teremben lévő reflexiók számát, illetve változásuk mértékét, ily módon javítva a teremérzetet [H. List].

3.1.3. A modell hanghűsége

A Hammond-orgonáról tehát belátható, hogy egy körültekintően megtervezett, az adott kor technikai és gazdasági lehetőségét jól kihasználó mérnöki alkotás. Jellegzetes hangjával bevonult a zenetörténetbe, de a klasszikus orgona helyettesítésére (főleg Európában) nem nagyon alkalmazzák (jazz-ben és könnyűzenei irányzatokban annál inkább). Ennek oka az, hogy a hangszer hangja nem eléggé sípszerű.

Egyrészt az állandósult spektrumban nem érvényesül az a fizikai tény, hogy a felharmonikus-tartalom alapfrekvencia-függő. Ennek független állítását az orgona rendszertechnikája nem támogatja. A rendszer felépítésének másik problémája pedig az, hogy a közös generátorok miatt egy újabb billentyűt lenyomva, megváltozik a már szóló hangok hangszíne.

A tranziens jelenségek modellje két okból sem pontos. Az egyik az, hogy a szinuszgenerátorok állandóan működnek, ezért – a billentyűt nem a szinuszhang nullátmenetében lenyomva – a kimenő jel pattanást fog tartalmazni. Az így létrejövő pattanás nagyfrekvenciás komponensei az összegző transzformátor és az analóg erősítők véges sávzélességei miatt eltűnnek, ezért a hangszóróban csak egy mélyfrekvenciás „pukkanás” (angolul „pop”) hallható. Ezt a jelenséget a fejlesztőknek az évek során nem sikerült elrejteni (zenész vélemények szerint ez a Hammond-orgona egyik jellegzetessége, amin nem is szabad változtatni).

A másik probléma az egyes funkcionális egységek között ismertetett *Percussion*-effekt megvalósítása, amely két okból sem hasonlít a sípokra. Az egyik az egyszeri triggerelés, illetve az, hogy a sípok legnagyobb részének nem a harmonikus komponense okozza a „köpködő” megszólalást, hanem általában a kezdeti zajcsúcsok, vagy magasabb rendű harmonikus komponensek (lásd a 28. oldalon, a 2.3.4. fejezetben).

A sípok sztochasztikus jelenségeinek modellezését a Hammond-orgonában található *Vibrato* és *Chorus* effekt végzi. A modell azonban csak az összegjelre teszi rá ezeket az effekteket, tehát a megszólaló hangok egyediségét nem segíti elő. A sípokra jellemző zajjal ez a modell nem foglalkozik.

A külső körülmények közül a modell a teremhatást veszi figyelembe, a már részletezett zenetövevel, illetve a hangszer „jelenérzetét” valósítja meg a *Leslie*-effektus

segítségével. Ezek az effektek hatásosak ugyan, de inkább a hangszer egyediségét növelik, mintsem a klasszikus orgonára való hasonlóságát.

Végeredményben a Hammond-orgona valóban egy jó hangszer, mert rengeteg zenész által beállítható paramétere van. Klasszikus orgonán játszó művészeknek, sípos orgona speciális körülmények között való kiváltására azonban nem alkalmas, mert az orgonahangra jellemző pszichoakusztikai paramétereknek csak töredékét valósítja meg.

3.2. Analóg áramkörös orgonák

A Hammond-orgona könnyűzenében aratott sikerei hatására a hangszintézisek, az elektromos hangelőállítás kutatása gyors fejlődésnek indult. Megjelentek a tisztán elektroncsövet tartalmazó elektromos hangszerek, majd a diszkrét félvezetős technológia elterjedésével ezek a hangszerek egyre kisebbé, könnyebbé váltak, továbbá hatásfokuk is javult. Újfajta (modulációs) szintézisek jöttek létre [Kruza85]. Az elektromos orgonák piacán is változások történtek, nagyon sok olyan hangszer jelent meg, amely a Hammond-orgonát próbálta olcsóbb elektromos áramkörökkel modellezni⁵. A hangszerpiac hangzásminőség szempontjából eligénytelenedett, a nagy versenyhelyzet miatt elsősorban a gazdaságos gyártásra rendezkedtek be az elektromos orgonákat gyártó cégek.

Kisebbszámúban ugyan, de továbbra is voltak olyan irányú kutatások, amelyek kifejezetten a sípos orgona helyettesítésére való hangszerek kifejlesztésére törekedtek.

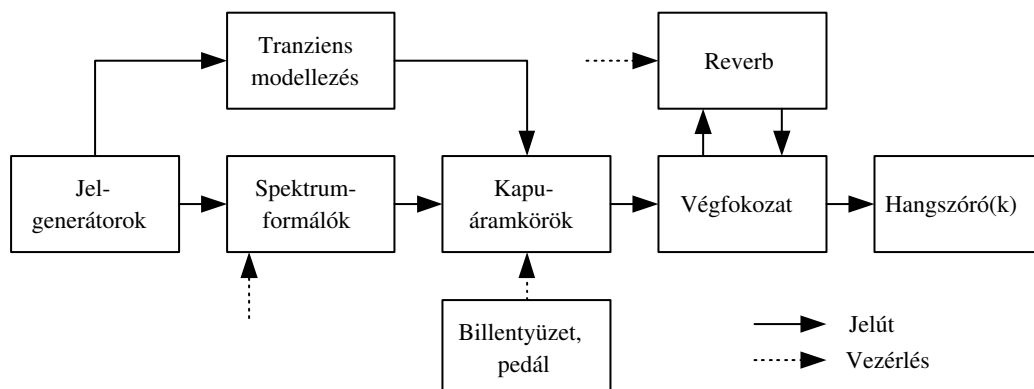
3.2.1. A szintézis alapelve

Ezek a hangszerek a felharmonikusok számának gazdaságos növelése érdekében és az áramköri lehetőségek optimális kihasználása érdekében nem additív, hanem szubtraktív (kivonó) szintézist alkalmaztak. Ez azt jelenti, hogy egy ilyen rendszer bemenőjele egy (vagy több) olyan alapjel, amely felharmonikusokban gazdag. Ilyen tipikusan használt jelek a háromszögjel, a (nem teljesen szimmetrikus) négyszögjel, vagy a hiánytalan felhangsorú (exponenciális felfutást tartalmazó) periodikus jelalak. A különböző hangszíneket (az elektromos orgona regisztereit) a bemenőjelekből szűrőkkel alakítják ki [Fürjes96]. A különböző kisegítő áramkörökkel módosított hang végül hangszórórendszeren keresztül tehető hallhatóvá.

3.2.2. Funkcionális egységek

A különböző cégek által gyártott analóg áramkörös orgonák összevont blokkvázlata látható a 3.2. ábrán.

⁵Persze, a Hammond-orgonán játszó zenészeknek ezek a modellek ugyanúgy nem felelnek meg, mint ahogy a Hammond-orgona a klasszikus orgonán játszóknak.



3.2. ábra. Analóg áramkörös orgonák blokkvázlata

Az orgonában a hanggenerátor állítja elő a már tárgyalt bemenőjeleket. Sok regiszterhez igen sok alapfrekvenciájú jelre van szükség⁶. Ennek többféle megoldása is fellelhető az irodalomban [Albert87, I. rész]. Az egyik véglet az, hogy mindegyik szükséges alapfrekvenciát külön oszcillátorral valósítják meg. Ez nyilvánvaló, hogy igen gazdaságtalan egy nagyobb orgonamodell létrehozásakor. A másik véglet pedig az, amikor a rendszerben egyetlen oszcillátor van. Ebből egy analóg IC segítségével előállítható az egyenletes temperálású⁷ zenei skála, majd abból frekvenciafelezőkkel előállíthatók a szükséges alapfrekvenciák.

Ez utóbbi módszerrel – bár kétségkívül olcsó –, több probléma is van. Az egyik az, hogy az ily módon előállított hangok nagyon egységesen fognak szólni, az egyes regiszterek (különösen az oktávregiszterek) hangkaraktere elvész, beleolvadnak az alapregiszterbe. A másik probléma pedig az, hogy a klasszikus orgona többi felhangregisztere (kvint, tervregiszterek) természetes hangolású. A temperált hangolással előállított ilyen jellegű felhangregisztereket az alapregiszterrel együtt hallgatva, az alapregiszter felharmonikusai és a felhangregiszterek alaphangja együttesen hamisnak fog tűnni, esetleg kellemetlen lebegéseket okoznak. A harmadik probléma pedig az, hogy a hallás szélsőséges frekvenciákon nem a kétszeres frekvenciát érzi egy oktávnak, hanem annál nagyobb frekvenciaarányt. A jelenséget oktávterpeszkedésnek hívják. Tisztára hangolt zongoráknál, orgonáknál ki is mérhető, hogy a skála szélein a hangolók a hangközöket nagyobb távolságra hangolják, mint ahogy az matematikailag ideális lenne [Tarnóczy82], a matematikailag pontos hangolás tehát a fül számára hamis. Az ismertetett okok miatt igényesebb hangszerekben köztes

⁶Pl. egy *Principálkar* kiépítéséhez (amely tartalmaz 8', 4', 2 2/3', 2', 1 1/3', és 1' hangmagasságú regisztereket) egy 61 billentyűs hangszeren összesen 97 különböző frekvenciájú oszcillátorra van szükség. Más hangszínű regiszterhez pedig másik alapjel kell.

⁷A 12 hangú zenei skála akkor egyenletes temperálású, ha az oktávot (kétszeres frekvencia-távolságot) egyenlő arányban osztják el a hangok, vagyis két szomszédos hang frekvencia-aránya $\sqrt[12]{2}$.

megoldásokat alkalmaznak (pl. külön generátor az oktáv minden hangjára, külön generátor-rendszer a kvint-, terc-, szeptimregiszterekre, stb.) [Albert87, I. rész].

A blokkvázlat következő eleme a szűrőbankokat tartalmazó rész. Analóg áramkörös orgonákban általában eltűnik a felhasználó által történő felharmonikus-arány állítás, inkább – a sípos orgonák mintájára – előre beállított regiszterek választhatók. Az egyes regiszterek állandósult spektrumát oktávonként vagy – igényes hangszerek esetén – akár féloktávonként eltérő szűrőkészletek állítják be. Ily módon jól kézben tarthatók mind a regiszterek közti különbségek, mind pedig az egyes regisztereken belüli változások is [Albert86].

A tranzisztoros, illetve a később megjelenő és egyre olcsóbbá váló analóg integrált áramkörös technika segítségével egyre összetettebb modelleket lehetett nagy megbízhatósággal létrehozni [Douglas68]. Ezáltal az analóg orgonák tranziens jelenségei is egyre inkább kezdtek hasonlítani a sípos orgonák hasonló tulajdonságaikhoz, továbbá különféle frekvencia-, amplitúdómodulációk segítségével egyre jobban tudták modellezni a kvázistacionárius állapotot [Albert78].

3.2.3. A modell hanghűsége

Az analóg áramkörös orgonák segítségével jóval pontosabb modellek készültek a sípos orgonáról, mint az elektromechanikus modell. Sok olyan templom van, ahol mind a mai napig ilyen, szubtraktív elven működő hangszer található.

Az állandósult állapotbeli spektrumot ezek a modellek a dús felharmonikustartalmú sípokra jól közelítik, problémásabb a kevesebb harmonikussal rendelkező regiszterek megvalósítása. Gyakran probléma az is, hogy skálát hallgatva feltűnő a szűrőparaméterek változása, különösen ha minden regiszteré ugyanott van (és ez – egyszerűsége miatt – eléggé elterjedt megoldás).

Állandósult állapotban az ilyen orgonák hangjai ritkán tartalmaznak zajt, inkább modulációkat alkalmaznak. Ezek problémája, hogy – a szintézis alapelve miatt – az összes felharmonikusra hatnak, a sípoknál pedig ezek a paraméterek harmonikusonként eltérők (lásd a 2.3.4. fejezetben). Igazi sípok mintáit vizsgálva főként azoknál a harmonikusoknál jogos a modulációs megközelítés, amelyek amplitúdója már eléggé kicsi, és összemérhető a zajjal. Frekvenciamoduláció a berezgés elmúltával nem jelentős, ennek alkalmazása nem indokolt.

A tranziensek modellezése, a „köpködős” megszólalás megvalósítása elég meggyőző is tud lenni, bár a modellbe csak extra költséggel lehet beleépíteni mind a zajt, mind pedig egy-egy harmonikus alapharmonikustól erősen eltérő jellegét, mivel a szintézis alapstruktúrája nem támogatja a harmonikusonkénti független amplitúdó-változást.

A külső körülmények közül a teremérintet ezeknél az orgonáknál ritkán valósítják meg, mivel főként nagy termekben, illetve templomi használatra tervezték őket. Általában minden mű külön végerősítőt kap, és lesugárzása – főleg a mélyfrekvenciás tartományban – bonyolult hangsugárzó rendszereken történik, amely a térben kellően lazán van elhelyezve, így a hangforrás mérete jól közelíti a klasszikus orgona méretét (pl. a debreceni református nagytemplomban van egy ilyen hangszer). A

mélyhangok lesugárzására több hangsugárzórendszert is kidolgoztak (természetesen ezek a hangszórómegoldások a további – alapelvben eltérő – modellekben is használhatók). Az egyszerűbb modellek csak egy basszreflex rendszert alkalmaznak, a nagyobb orgonák vagy egy külön sugárzó subwoofert, vagy ún. transmission line⁸ sugárzórendszert használnak, illetve – egy magyar szabadalom nyomán – hangolt rezonátoros mélyhangsugárzókkal⁹ segítik a mélyhangok lesugárzását.

Összefoglalva, az analóg áramkörös orgonák jó hangminőséget tudnak produkálni, különösen, ha az orgonától távol, a templomtérben hallgatják [Albert87, IV. rész]. Kialakításuk során elég sok gondot fordítottak a pszichoakusztikai paraméterekre, ha ezek modellbe történő integrálását a rendszer nem is mindig tette lehetővé. További (technikai jellegű) problémájuk a megbízhatóság, valamint a nagybonyolultságú analóg áramkörü panelek között megjelenő áthallás és zaj, amely korlátozza méretüket.

3.3. A mintavételezéses eljárás

A '70-es évek közepére a digitális technika fejlettsége elérte azt a szintet, hogy komoly vetélytársként lépjen fel az analóg szintézisek ellen. Mivel kezdetben a digitális rendszerek nem voltak képesek nagyobb fókuszámú szűrők valós idejű futtatására, ezért a klasszikus additív és szubtraktív szintézisek helyét egyéb, egyszerűbben megvalósítható elvek vették át. Ilyenek egyrészt a különféle modulációs szintézisek (FM, AM, PM¹⁰), amelyek érdekes hangzásokat tudtak létrehozni, de akusztikus hangszerek modellezésére kevésbé voltak alkalmasak [Fürjes96]. Ezek mellett jelent meg az ún. PCM szintézis, amely azóta vezető szerepet tölt be az elektromos (illetve digitális) hangszerek piacán.

3.3.1. A szintézis alapelve

A mintavételezés elve nagyon egyszerű: úgy kapjuk egy akusztikus hangszer „legélet-hűbb” hangját, ha felvesszük, eltároljuk és szükség esetén a felvételt visszajátszuk. Maga az elv már régóta ismert volt, analóg technikákkal (mágneses rögzítéssel) is kísérleteztek, de a minőségromlás nélküli tárolást csak a digitális technika tudta megoldani.

⁸Akusztikus labirintus. Lényege, hogy a mélyhangsugárzó mögé egy olyan általában „összehajtogatott” akusztikai cső kerül, amely a hangszóró alsó határfrekvenciája közelében kiemel, így a rendszer átvitele javul.

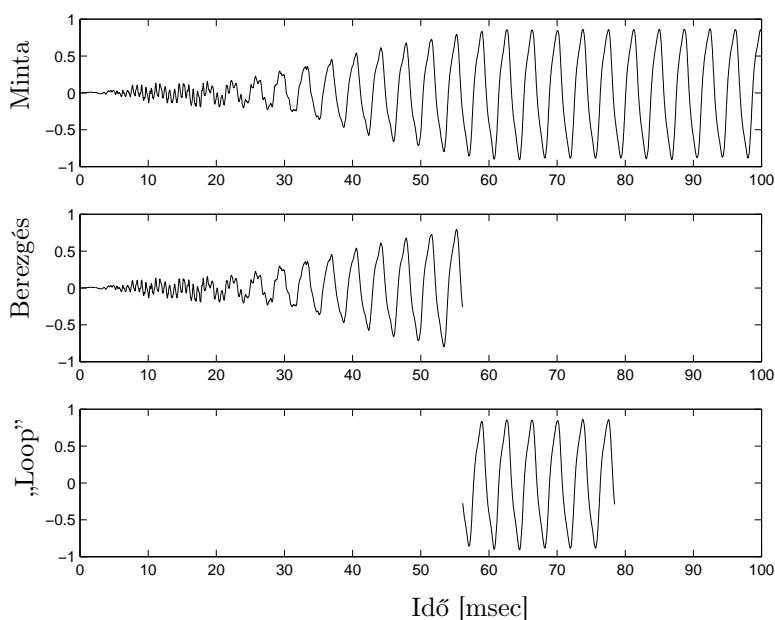
⁹A rezonátoros mélyhangsugárzó az akusztikai impedancia-transzformáció elvén működik, részletesebb leírása az [Albert82] szabadalomban található.

¹⁰A PM itt Phase Modulation-t, fázis modulációt jelent, a későbbiekben a Physical Modeling-et, a fizikai modellezést fogja jelenteni.

3.3.2. Redundanciacsökkentés

Az alapelv közvetlen alkalmazása megköveteli, hogy különböző hangmagassághoz és hangerő-értékhez különböző minták legyenek tárolva¹¹. Ez nyilván nem kivitelezhető, különösen orgonánál nem, ahol több száz vagy több ezer síp is van¹². A hangminták tárolásának tömörítésére két tényt használnak ki.

Az egyik az, hogy az állandósult állapottal rendelkező hangszerek közel periodikus jelet generálnak, ezért elegendőnek tűnik csak a tranziens berezgést eltárolni, valamint az állandósult szakaszból egyetlen periódust. Visszajátszáskor a tranziens szakasz lejátszása után csak ismételtetni kell a kitartandó szakaszt (angol nevén *Sustain Loop*-ot), csak arra kell vigyázni, hogy a periódusok közötti átmenet sima legyen, ne „kattogjon”. Ezt a tárolási módszert mutatja a 3.3. ábra, az ilyen elven működő szintézist nevezik hullámtáblás (Wavetable) szintézisnek¹³.



3.3. ábra. A hullámtáblás (wavetable) szintézis

További egyszerűsítést jelent, hogy a szintézis azt is feltételezi, hogy a hangszer hangja nem nagyon változik az alaphang frekvenciájában. Így, egy minta gyorsabb vagy lassabb kiolvasásával helyettesíteni lehet a környező néhány mintát. Az eljárás nem más, mint mintavételi frekvencia konverzió, amely a mai célhardverekkel gazdaságosan megvalósítható (felfelé történő konverzió esetén természetesen a Shannon-féle mintavételi tétel betartandó).

Ezt a két redundanciát kihasználó szintézistechnikát nevezik PCM-nek, vagy más néven *Sampling*-nek. Ezzel az imént vázolt eljárással megoldható, hogy csak

¹¹Pontosabban, az összes létező vezérlő-kombinációhoz fel kell venni a hangmintákat.

¹²A tatai református templom orgonájában (amely egy kis orgona) hét egysoros és egy háromsoros regiszter tartozik a 49 billentyűs manuálhoz, ez 490 sípot jelent.

¹³Gyengébb minőségű hangszereknél csak egy periódust tárolnak el, és a berezgést egy amplitúdóburkolóval modellezzik. Ez a megoldás nem túl jó minőségű, de nagyon kevés memória kell hozzá.

féloktávonként vagy oktávonként, esetleg még ritkábban kell a hangszer hangját mintavételezni (ez ismét csak ár/minőség arány kérdése).

3.3.3. A modell hanghűsége

A modell elve első pillanatban teljesen jónak tűnik, hiszen „pontosan visszaadja a hangszer hangját”. Alapproblémája az, hogy – az iménti közhiedelemmel szemben – nem egy hangszer hangját tárolja és játssza vissza, hanem egy hangszer adott pillanatbeli determinisztikus állapotát.

Az állandósult spektrummal semmi probléma nincs, pontosan visszaadja a hangszer komponenseit, ha az adott minta az adott magasságban lett mintavételezve. Eltolt mintánál már lehetnek kisebb eltérések, de egy szűk határon belül ez valóban nem feltűnő¹⁴. Az így kiolvasott jel azonban – a sípokhoz képest – túlságosan stabil lesz. Ezen úgy szoktak segíteni, hogy a minta loop-szakaszát nem pontosan, hanem valamilyen modulációval játssza le a hangszer.

A sztochasztikus jelenségek modellezése azonban nem megoldott. A zaj illetve a véletlen modulációk visszaadása egy ilyen szintézisben nem lehetséges, hiszen a jel determinisztikus, és periodikus. Bizonyos kutatások vannak, amelyek ennek kiküszöbölésére irányulnak, ezek a megoldások a zajt külön keverik hozzá a síphoz (tehát alapelvük már nem a PCM).

A tranziensek visszadásának problémája az, hogy egy ilyen minta egyetlen állapotot tárol, azaz a hangszer megszólalásának változatosságát nem tudja visszaadni. Ráadásul egy ilyen mintavett jel esetében semmilyen olyan paraméter nem adható meg, amely segítségével a tranziensen változtatni lehetne, mivel csak a minták állnak rendelkezésre. Vannak olyan kísérletek, amelyek (pl. zongoránál) a hangosabb, halkabb visszaadást szűrőkkel próbálják közelíteni, pedig sok esetben egészen megváltozik a hangszín is. Orgonasípoknál a vezérlés nem annyira probléma, a berezgési folyamat zaja, a síphang felépülése viszont nem determinisztikus. Valamit javíthat a PCM-szintézis determináltságán a több minta eltárolása és véletlenszerű választás a minták között, a kötött struktúra azonban nem támogatja a sztochasztikus, illetve általánosabban a dinamikus paraméterek modellezését.

A frekvenciakonverzió problémája pedig az, hogy ily módon nemcsak egy síp, hanem a környezetében lévő összes többi síp paramétereit determinálja a modell, ezáltal megint csak a sípok egyénisége vesz el.

Ezen kifogások ellenére manapság a digitális orgonákat előállító cégek (honlapjaik címét lásd az F.6. függelékben) kizárólag ezt a szintézist használják. Különbségek csak a felbontásban (16-20 bit), a mintavételi frekvenciákban (44.1–54 kHz) valamint a marketingben és a szolgáltatásokban vannak (illetve ez utóbbiaknak megfelelően az árban). Az Interneten található anyagok alapján úgy tűnik, hogy csak az amerikai [Rodgers] és a németországi [Ahlborn] cég foglalkozik az orgonahang sztochasztikus paramétereinek valamilyen módon történő leképzésével és megvalósításával, olyannyira, hogy modelljeik már messze túlmutatnak a PCM szintézisen és hasonlítanak a 4. fejezetben bevezetett szintézishez.

¹⁴Túl ritka mintavételezés esetén skálát játszva persze hallhatók a mintaváltások.

3.4. A fizikai modellezés

Az eddig leírt szintézisek mind a hangszerek (azon belül az orgona) hangjának modellezését, élethű reprodukálását tűzték ki célul. Az alapelvek az elektronikus jelgenerálás témaköréből származók voltak, legfeljebb az egyes alapelvek paraméterei kifejezetten egy-egy hangszer jellemzőinek megfelelően súlyozódtak.

Az ilyen szintézisek egyrészt eleve behatárolják a modellezhető hangszereket, hangszerkategóriákat, továbbá az alapelv változtatható paraméterei behatárolják a leképezhető hangszerspecifikus paraméterek számát és minőségét. Például az additív szintézis a nagy felharmonikus-tartalmú hangszereket nem tudja jól kezelni, a PCM szintézis pedig paramétereiben nagyon szegény.

3.4.1. A szintézis alapelve

A modellező szintézis túllép az eddig bevezetett szintéziseken, mivel nem a hangot, hanem a hang keletkezési mechanizmusát vizsgálja és próbálja meg reprodukálni. Az eljárás feltételezi, hogy egyrészt a hangszer hangja és fizikai jellemzői között van egyértelmű leképezés, másrészt – ennek közvetlen folyományaként – a hangszer hangja és a fizikai modell paraméterei között is található hasonló transzformáció [Fűrjes96].

Az alapelv következménye az, hogy az így keletkező modell hangjai nem egymástól független eseményekként fognak előállni, hanem – a hangszermodell belső változói miatt – egy adott hang létrejöttének körülményeit az előző hangok befolyásolják. Ezen tulajdonságaival a fizikai modell (Physical Modeling) alapú hangszintézis az összes eddigi vetélytársát felülmúlhatja a virtuális akusztikus hangszerek létrehozása terén.

3.4.2. Modellalkotás

A fizikai modellhez tehát létre kell hozni a hangot előállító hangszer modelljét úgy, hogy az valós időben működtethető legyen. Ez a feladat azonban nem egyszerű.

Ajaksípok legkézenfekvőbb leképezése az az áramlástanai modell lehet, miszerint egy adott sebességű légáramban az orgonasíp megjelenik, mint „határfeltétel”. Konkrétabban a beáramló levegő sebessége a síplábyuknál adott, peremfeltételek pedig a sípfal, a magrés, az ajkak és a sípláb. Tetszőleges áramlástanai feladat megoldható az áramlástanban ismert Navier–Stokes differenciálegyenlet-rendszer segítségével, de a zárt alakú megoldás még egyszerűbb esetekben sem állítható elő. Ennek megfelelően készült is olyan fizikai modell, amely végeselem-módszerrel (vagy más néven rácsmódszerrel) oldja meg a fent említett egyenletrendszert, a sípparamétereket használva peremfeltételnek. Az eljárás valóban jó, az akusztikai tér minden pontjában szolgáltatja a hangnyomás és a részecskesebesség időfüggését, és a kapott eredmények nagyon jól egyeznek igazi sípok hasonló mérési eredményeivel. Az ilyen szintézis gyakorlati alkalmazhatósága azonban csekély, egyrészt mert hangkeltés szempontjából rengeteg felesleges információt szolgáltat, másrészt valós idejű megvalósításának hardverköltése nagy [Skordos95].

Egy használhatóbb, egyszerűbb fizikai modell létrehozásához a modellezendő hangszert célszerű funkcionális blokkokra osztani. Egy ilyen általános felosztás lehet a következő:

- Rezgés-előállító, gerjesztő tag (a rendszer itt vezérelhető);
- Rezgésformáló, spektrumalakító rezonátor tag (belső állapotváltozók);
- A sugárzást elősegítő kicsatoló tag (a rendszer kimenete);

továbbá az egyes blokkok közötti kapcsolatrendszer, amely elég összetett is lehet (általában tartalmaz visszacsatolásokat) [Fletcher91].

Ez a felosztás könnyen alkalmazható az orgonasípok fizikai modelljének megalkotásához is. A 15. oldalon, a 2.2. alfejezetben, az orgonasípok fizikai tárgyalásánál olvasható, hogy ajaksípknál az áramló levegő és a felső ajak közti kölcsönhatás eredményeképpen létrejövő ékhang a gerjesztés, a rezonátor szerepét a síptest tölti be, a kicsatolás pedig az ajaknál és a síp felső végénél jön létre.

Az orgona irodalma már 1885(!) óta foglalkozik az ilyen rendszerű fizikai modell megalkotásával, szintézisre azonban csak az 1980-as évektől kezdték használni. Napjainkban az IRCAM és a CCRMA foglalkozik intenzíven ilyen kutatásokkal.

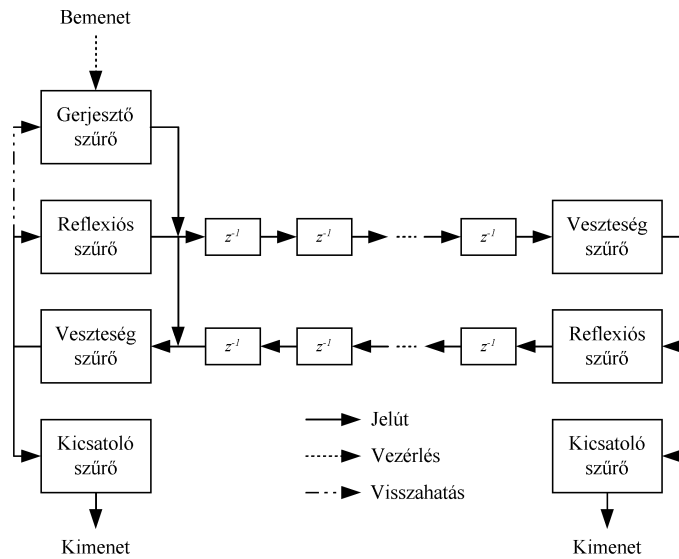
A síp modelljében a kicsatolást lehet a legegyszerűbben megvalósítani, egy frekvenciafüggő sugárzási karakterisztikát kell modellezni, célszerűen digitális szűrővel.

A rezonátorra egy nagyon hatékony megoldás az egydimenziós hullámegyenlet analitikus megoldásának megvalósítása, amely egy haladó és egy reflektált hullámra bontható fel [Horváthné98]. Ennek egyszerű időtartománybeli szimulációját valósítja meg a Waveguide szintézis, amely a terjedő és a visszavert hullámot egy-egy előre- és hátraírányú késleltetőláncsal modellezi (3.4. ábra) [Smith93]. A lezárásoknál keletkező frekvenciafüggő reflexiók a két késleltetővonal szűrőn keresztül történő összekötésével építhetők bele a modellbe. Lineáris megközelítés esetén a terjedés közben fellépő veszteségek összeadhatók, és koncentráltan vehetők figyelembe, sőt, ily módon az összes szűrő is összevonható, és csak egy késleltetőláncot kell megvalósítani (ezt az ábra nem mutatja) [Smith93].

Ajaksípk esetén a legnagyobb probléma az ékhang-gerjesztés egyszerű, de hatékony modellje, illetve a generátor és a rezonátor közti kölcsönhatások implementálása. Mivel az áramlástan elméleti tárgyalás túl bonyolult, nem az eredeti fizikai leírást modellezzük. Egyszerűbb módszer eredeti sípkon méréseket végezni, majd a kapott mérési eredményekre nemlineáris (n -edfokú polinom) függvénykapcsolatokat illeszteni (néha speciális nemlineáris optimalizáló eljárásokkal, mint például a genetikai algoritmus). A modell gerjesztőszűrője tehát egy nemlineáris szűrő, amely az így kapott fél-fizikai paraméterekkel állítható [Verge95], [Välimäki92].

3.4.3. A modell hanghűsége

A szintézis elméletileg tökéletesen visszaadja a modellezendő hangszer hangjának pszichoakusztikai és fizikai jellemzőit, mivel magát a hangszert modellezi.



3.4. ábra. Az orgonasíp Waveguide modellje

A piacon található hangszerek közül azonban csak kevésben található meg a fizikai modell alapú hangszintézis. Ennek oka az, hogy a számítási igénye már egy egyszerűsített modellnek is nagy, különösen pl. egy orgonamodellnél, ahol minden szóló sípra külön kell egy komplett fizikai modellt számolni, kiegészítve a sípok között létrejövő csatolási jelenségekkel.

A működő fél-fizikai modellek másik problémája pedig az, hogy a fent említett módon meghatározott paraméterek és az eredeti fizikai rendszer paraméterei közti transzformációk nehezen találhatók meg, illetve a pszichoakusztikai szempontból fontos hangparaméterek megfelelőjének definiálása nem is mindig lehetséges.

3.5. Következtetések

Az orgonahang pszichoakusztikai jellemzői (2.3. fejezet) szempontjából vizsgálva az imént leírt szintéziseket, jól látható, hogy olyan szintézis, amely gazdaságos, ugyanakkor a hallás szempontjából fontos paramétereket integrálja, nem sok van.

Az egyik modell, amely próbálja figyelembevenni a legtöbb pszichoakusztikai paramétert, a már tárgyalt Ahlborn és Rodgers orgonagyártó cégek által továbbfejlesztett PCM-szintézis, amely működéséről – érthető okokból – nem található publikus műszaki információ. Hasonló – vagy még jobb – eredményt érhet el a fizikai modell, amelynél azonban a helyes modell megtalálása elméleti, valós-idejű megvalósítása pedig gyakorlati korlátokba ütközik.

4. fejezet

A jelmodell alapú szintézis

A mérnöki-fizikai gyakorlat jelnek nevez minden olyan időben változó fizikai jellemzőt, amely valamilyen információt hordoz. A hangjelek is ilyen információhordozók, ezek közvetítik – amint arról már a pszichoakusztikai jellemzők tárgyalása során szó volt – a hallás számára egy hangszer minden tulajdonságát. A hallásmechanizmus ezekből az információkból a számára fontosakat kiemeli, a kevésbé fontosakat pedig nem érzékeli, illetve nem foglalkozik velük.

Logikus tehát az a következtetés, hogy egy olyan szintézisnek, amely megvalósítja egy hangszernek fül által érzékelt összes jellemzőjét, megtévesztően jó minőségű hangot kell adnia. Természetesen egy koncerten való részvételkor a hallgatót számtalan egyéb inger éri (legfőképpen a látást), amelyeket egy ilyen, hallásra optimalizált szintézis nem tud előállítani, ez azonban nem is cél. Rögzített felvételek hallgatásakor, illetve olyan esetekben, amikor az előadóművész nem látható (az orgona tipikusan ilyen), az eredmény meggyőző lenne. Egy ilyen szintézisnek további előnye lehetne az, hogy éppen azért, mert a hallásparaméterek alapján állítja elő a hangot, könnyen és hatékonyan változtathatók az egyes hangszerjellemzőket megvalósító elemei, ha a kívánt jellemző nem elég karakteres, vagy éppenséggel túlságosan aránytalan.

A fejezet pontosan egy ilyen modellt ismerteti, amely kifejezetten orgonasípok hangját állítja elő. Ehhez először is a bevezetendő szintézist az emberi hallás által fontosnak ítélt paraméterek megvalósítására kell optimalizálni. Első lépésként tehát a sípok hangjának modellezéséhez fel kell állítani egy olyan alapkoncepciót, amely a domináns jellemzőket magában foglalja, majd ki kell egészíteni azokkal az elemekkel, amelyek az orgonasípok hangjának egyéb jellegzetességeit is megvalósítják. Az így létrehozott szintézist olyan paraméterekkel kell vezérelni, amelyek megegyeznek vagy legalábbis hasonlóságot mutatnak az orgonasípok megfelelő paramétereivel. Legjobb eredmény nyilván akkor érhető el, ha a vezérlőparamétereket az analízis miatt úgyszólván rögzítésre került orgonasíphangok további elemzésével állítja elő egy analízis program. Az így kapott paraméterekkel a szintézis hanghűsége valós időben, illetve off-line is tesztelhető.

A fejezet ennek megfelelően bemutatja a jelmodellt, továbbá részletesen ismerteti annak a programnak a szintézis-paramétereket meghatározó részét, amely a síphangok analízisére is használható. Összefoglalja a bevezetett hangszintézis meg-

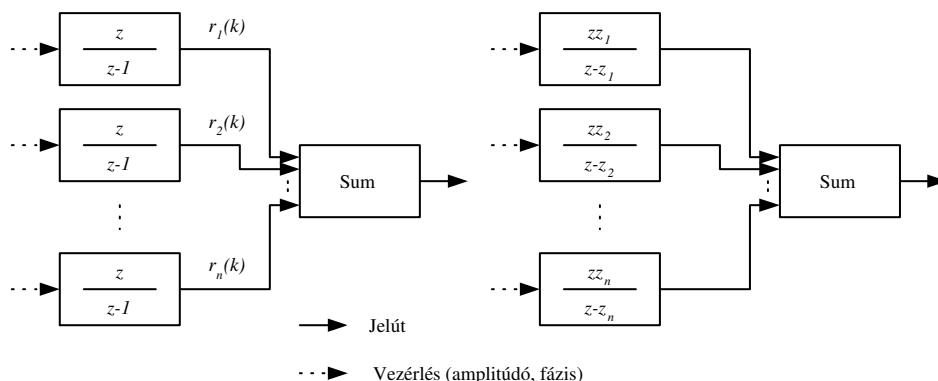
valósítási lehetőségeit, végül bemutatja a létrehozott kétféle megvalósítás érdekesebb részleteit.

4.1. A koncepcionális jelmodell

A sípok hangjának analízisénel (2.3. fejezet) megállapítást nyert, hogy a sípok hangja döntően periodikus és véges számú domináns diszkrét komponenset tartalmaz. Továbbá, a 2.3.4. fejezetben, a tranziensek vizsgálatánál az is bebizonyosodott, hogy az egyes felharmonikusok egymástól függetlenül épülnek fel és frekvenciájuk a tranziensek közben nem változik. Kézenfekvő tehát az a megoldás, hogy az orgonasípok modellezésének alapkonceptiója a periodikus jel diszkrét idejű modellje legyen.

4.1.1. A periodikus jel modellje

Jól ismert, hogy minden periodikus jel felbontható szinuszos komponenseire a Fourier-sorfejtés segítségével [Fodor94b]. Ennek megfelelően minden ilyen jel a megfelelő szinuszos komponensek összegeként előállítható. Egy ilyen elven működő periodikus jelgenerátor két, paraméterrendszerében eltérő megvalósításának elméleti modellje látható a 4.1. ábrán [Péceli86].



4.1. ábra. A periodikus jel diszkrét idejű modellje (a) idővariáns, (b) időinvariáns paraméterekkel

A 4.1a ábra valójában egy olyan diszkrét idejű jelgenerátor, amely sávkorlátozott periodikus jelet állít elő, N komplex komponens összegeként. A jel úgy jön létre, hogy az ábrán látható N integrátor bemenetére egységimpulzust kapcsolva, a kimenetén megjelenő egységugrás k . értéke szorozódik a Fourier-sor megfelelő ún. exponenciális bázisfüggvényének k . értékével. Egy komponens bázisfüggvénye a következőképpen írható le:

$$r_i = e^{j2\pi k \frac{f_i}{f_s}}, \quad (4.1)$$

ahol f_s a rendszer mintavételi frekvenciája, f_i a bázisfüggvény frekvenciája, k pedig a diszkrét idő. A rendszer kimenete az N független csatorna összege.

Annak érdekében, hogy többféle jelalakot is elő lehessen állítani, a Fourier-sorfejtés komplex együtthatóit (amelyek az egyes komponensek fázisait és amplitúdóit tárolják) az integrátorok bemenetére, az egységimpulzus helyére kell kapcsolni.

Ugyanennek a jelgenerátornak időinvariáns paraméterű megvalósítása látható a 4.1b ábrán. Az egyes komplex exponenciálisokat itt diszkrét idejű rezonátorok állítják elő. Egy f_i frekvenciát előállító komponens pólusának értéke:

$$z_i = e^{j2\pi \frac{f_i}{f_s}}, \quad (4.2)$$

közvetlen kapcsolatban áll a megfelelő bázisfüggvény értékével. A kezdeti feltételeket (amplitúdó, fázis) az előbbivel megegyező módon, a $k = 0$ időpillanatban kell a rendszer bemeneteire kapcsolni.

A jelmodellt diszkrét rendszerként vizsgálva, megállapítható, hogy (reprezentációtól függetlenül) N pólust tartalmaz az egységkörön¹. Az i . pólus fázisa pedig megadja az adott pólus relatív frekvenciáját ($\varphi_i = 2\pi f_i/f_s$).

4.1.2. A jelmodell alkalmazása hangszermodellezésre

A bevezetett jelmodell önmagában csak végtelen idejű periodikus jeleket képes előállítani. Ahhoz, hogy a modell hangszintézisre is alkalmas legyen, egyrészt el kell látni megfelelő vezérlőelemekkel, másrészt ki kell egészíteni olyan generátorral, amely a nemperiodikus komponenseket előállítja.

Az előbbi szakaszban bevezetett jelmodell diszkrét idejű, ennek nagy előnye, hogy digitális rendszerekben könnyen implementálható, továbbá tisztán szoftveres úton továbbfejleszhető, módosítható viszonylag kis anyagi ráfordítással. Éppen ezért, az egységes modell érdekében ügyelni kell arra, hogy mind a vezérlő, mind pedig a kiegészítő elemek ugyanígy, a digitális jelfeldolgozás egyszerűen megvalósítható elemei közül származzanak.

Az orgonasípok analízise során, a 2.3. fejezetben, a sípok pszichoakusztikailag fontos paraméterei már előálltak. Ezeket az elemeket lépésről lépésre integrálva a modellbe, megkapható a jelmodell hangszintézisre alkalmas változata.

Az orgonasípok hangszínét meghatározó diszkrét komponensek amplitúdója és fázisa az alapkoncepcióban az integrátorok bemeneteként definiálható, további elemek hozzáadására nincs szükség. Az egyes harmonikusok frekvenciájának modellbe történő bevitele szintén nem okoz problémát, a modellbeli bázisfüggvények, illetve pólusok frekvenciáit a következőképpen kell megvalósítani:

$$f_i = i f_0, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (4.3)$$

ahol f_0 az adott síp alapfrekvenciája.

Sípoknál a sztochasztikus jelenségek elsősorban a részletesen tárgyalt speciális zaj formájában jelennek meg (2.3.3. szakasz). Ennek megvalósítása diszkrét jelgenerátorokkal nehézkes, illetve gazdaságtalan. Célszerűbbnek látszik a periodikus

¹Csak így lehetséges az, hogy a rendszer egy véges hosszúságú bemenőjelre (egységimpulzus) végtelen idejű választ adjon (vagyis a rendszer a stabilitás határhelyzetében működjön) [Fodor94b].

jelgenerátort kiegészíteni egy olyan zajgenerátorral, amely a kívánt spektrumú zajt előállítja, ugyanakkor egyszerűen megvalósítható.

Mivel orgonasípoknál a zaj általánosan jellemezhető véges számú különböző (nemharmonikus) frekvenciájú zajcsúcs összegeként, kézenfekvő a modellben is így megvalósítani az egyes csúcsokra illesztett szűrőkkel.

A sípoknál a tranziens jelenségek az egyes harmonikusok amplitúdójának exponenciális jellegű változását jelentik. Az amplitúdó-változás a modellbe burkológörbe-generátorokkal valósítható meg egyszerűen. Ezeket a burkológenerátorokat pedig – az egységes kezelhetőség érdekében – szintén érdemes szűrőkként kialakítani. Az orgonasípok hangját vizsgálva, megállapítható, hogy az egyes harmonikusok amplitúdója vagy alulról történő beállással, vagy egyszeri túllövással éri el az állandósult állapotot (eltekintve a kis amplitúdójú komponensektől, amelyek túl zajosak). Az állandósult állapotban az amplitúdók nem változnak jelentősen. Ez a folyamat gazdaságosan IIR-szűrők impulzus- vagy egységugrás-válaszaként közelíthető. Mivel az orgonahang állandó gerjesztésű hangszer, vagyis a harmonikusok nem csengenek le, az ugrásválasz használata hatékonyabb. Ily módon az i . harmonikus k . időpontbeli mintájának ($x_{i,k}$) előállítása:

$$x_{i,k} = h_{i,k} \operatorname{Re}\{A_i e^{j(2\pi k \frac{f_i}{f_s} + \varphi_i)}\}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.4)$$

ahol A_i és φ_i az adott harmonikus amplitúdója és fázisa, $h_{i,k}$ pedig a harmonikus burkolóját előállító szűrő ugrásválaszának értéke a k . időpillanatban.

Egyetlen paramétercsoport maradt, amelyet élethű hangszintézishez a modellnél figyelembe kell venni, a külső körülmények hatása. Orgonasípoknál ezek közül az akusztikai csatolás, a Mitnahme-effektus, a hangforrás-lokalizáció és a teremzert tartoznak ebbe a kategóriába (2.3.5. fejezet). Az is megállapítást nyert, hogy az orgonaművészeknél a teremzengés erős befolyásoló hatása nem annyira mérvadó, mert ők a sípok hangját közlő is ismerik, valamint a Mitnahme-effektus csak speciális körülmények között, ritkán észlelhető. Az akusztikai csatolás, a lebegés kialakulása pedig a sípok sztochasztikus jellemzőinek megvalósításával kialakul. Ezért a jelmodellben – kiindulásként – elég megvalósítani a hangforrások térben való elhelyezését.

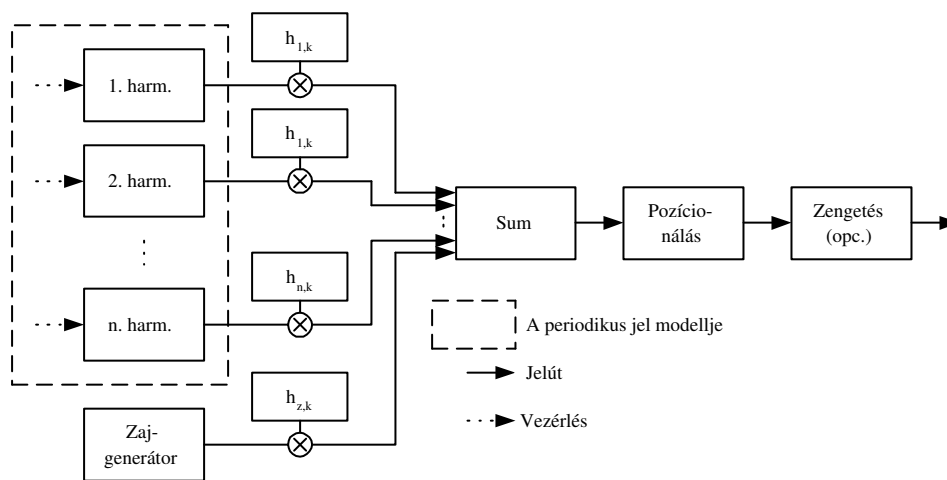
Ennek megvalósítására több lehetőség is van, a sztereó rendszerektől a többcsatornásakig, ennek megfelelően kisebb vagy nagyobb költséggel. Ismert azonban, hogy az orgonát alapvetően csak előlről, egy adott térszögből hallgatják. Az orgona felépítéséből következik továbbá, hogy egy művön belül a sípok ajkai nagyjából egy vízszintes síkban helyezkednek el. Ily módon elegendő lehet a sztereó modell, ha a sípok regiszteren belüli pozícionálását intenzitációs (és esetleg időkésleltetési) sztereofónia érzékelteti², az egymás mögötti regisztereket hangjának késését pedig egy további pozíciófüggő időkésleltetés modellezheti. A nyitott sípok felső sugárzása közvetlenül nem illeszthető ebbe a modellbe, pozíciófüggő időkésleltetéssel esetleg figyelembevehető. A rendszernek ez utóbbi hátránya mellett mindenképp előnye a gazdaságos megvalósítás.

²Intenzitációs sztereó esetén a két hangszóróban eltérő a hang amplitúdója, amelyik oldal hangosabb, ahhoz érezhető közelebb a hangforrás. Időkésleltetési sztereónál pedig, amelyik hangszóróban előbb szólal meg a hang, ahhoz érezhető közelebb a hangforrás [Takács98].

Amennyiben pedig a szintetizált hangot olyan közönség hallgatja, amelynek tagjai csak távolról, zengő teremben ismerik a sípok hangját, akkor vagy hasonló környezetben, vagy pedig mesterséges zengetővel kell a teremzengést előállítani.

4.1.3. Az integrált jelmodell

Az előző szakaszban áttekintett jellemzőket megvalósító integrált jelmodell látható a 4.2. ábrán.



4.2. ábra. Az integrált jelmodell

Az alapkonceptió – a periodikus jelmodell – valósítja meg az egyes harmonikusokat. Vezérlése a harmonikusok amplitúdójával és fázisával történik. A modellnek elég az alapfrekvenciát megadni, a harmonikusok frekvenciái (4.3) alapján kiszámíthatók.

A generátorrészt egészíti ki a zajgenerátor, amely a sípzajt állítja elő. Vezérlőjelei az egyes zajcsúcsok paraméterei, kimenete pedig a sípzaj.

A tranziens burkolókat állítják elő a rajzon $h_{i,k}$ -val jelölt blokkok, kimenetükkel szorozva a harmonikusokat, illetve a zajt, előáll a megfelelő amplitúdó. A burkológenerátorok belső paraméterei sípfüggőek, bemenetük egyszerűen a be-, illetve kikapcsolás triggerjele lehet.

A külső effektek a kész síphangra, azaz a burkolókkal ellátott komponensek összegére vannak hatással. A sztereó hangot előállító blokk, illetve az opcionális zengető ezért került a komponensek összegzése után. A sztereó teret előállító rész bemenő paraméterei a síp és a regiszter pozíciója, a zengetőnek külön nem kell sípfüggő paraméter, inkább a megvalósítandó terem paraméterei szükségesek hozzá, ezek tárgyalása azonban túlmutat a dolgozat keretein.

4.2. A paraméterek származtatása

Az előző fejezet bemutatta a jelmodell alapú szintézis elméleti modelljét. A modell számtalan belső és vezérlő paramétert tartalmaz, amelyeket egy adott síphoz (általában egy adott hangszerhez) be kell állítani. Ennek elvégzésére egyik lehetőség a síphangot egy adott kiindulási paraméterhalmazból valamilyen iterációval közelíteni, de ennek ellenőrzése illetve megvalósítása egyaránt nem egyszerű. Lényegesen jobb eredményt ad, ha a modellparamétereket eredeti sípok hangjának felvételéből nyeri ki egy erre a célra optimalizált program.

A feladat megvalósítására készült a `soundpar.m` MatLab-program. A program először előállítja a sípok jellemzőit (spektrum, berezgés, stb.), majd ezen jellemzőkre megkeresi a jelmodell paramétereit. A kapott analízis-eredményeket a 2.3. szakasz ismertette, a sípok pszichoakusztikai jellemzőinek vizsgálata során. A következő alszakaszok a program teljes működését, illetve az egyes pszichoakusztikai paraméterek jelmodell-paraméterekké történő konverzióját ismertetik. Az ábrák – az analízis-ábrákhoz hasonlóan – szintén reprodukálhatók a program segítségével, továbbá más hangszerre hasonló ábrái is előállíthatók.

A program használatára egy példa a függelékben, az F.3.1. szakaszban található. Továbbfejlesztéshez ennek a fejezetnek az elolvasása, illetve a megjegyzésekkel bőven ellátott programfájl tanulmányozása tanácsos.

4.2.1. A spektrum meghatározása

A program – a hangminta betöltése után – a spektrum vizsgálatához megkeresi a hang állandósult állapotát. Ugyanebben a részben állítja be a berezgés illetve lecsengés határait is. A határok megkeresése amplitúdófeltételek segítségével történik, kiindulás a maximális mintaérték, ennek 50%-aként megtalálható a felfutás és lecsengés „közepe”, amelyből az állandósult állapot már megadható, onnan pedig a spektrumhoz szükséges minták kiválaszthatók.

A felfutás és lecsengés a minta elején található zajszint túllépésével illetve a maximális minta adott százalékának elérésével állítható be. A program a felfutásnál és lecsengésnél az így kapott határookra „ráhagy”, valamint figyelembe veszi a tranziensek vizsgálatához használt szűrők késleltetését is. A vizuális ellenőrzés érdekében a programrészlet kirajzolja a megtalált határokat.

Ezután kerül sor a spektrum meghatározására, amelyet a program a MatLab ablakozott FFT függvénye segítségével számol ki. A használt Blackman-ablak a spektrum-szivárgás csökkentésére hivatott, normalizálása a helyes amplitúdók miatt szükséges. A jó frekvenciafelbontás, és a Blackman-ablak hatásának minimalizálására, $N = 2^{17}$ -es spektrumot számol a program, ami bármikor átírható az elején. Így módon a szükséges mintahossz ($\Delta t = N/f_s \approx$) 3 másodperc, az elérhető frekvenciafelbontás pedig ($\Delta f = f_s/N \approx$) 0.33 Hz. Az eredményt kirajzolva megkapható az orgonasípok jellegzetes spektruma, amelyet az analízis fejezet már részletesen tárgyalt.

További feladat a diszkrét frekvenciakomponensek megkeresése. Mivel orgonasípoknál nem minden esetben maximális az alapfrekvencia amplitúdója, ezért a sípok

névleges frekvenciája segítségével keresi a program az alapharmonikust. A bemeneti fájlnevnél tartalmaznia kell a frekvenciájának megfelelő MIDI-kódot (*MIDI note number*-t), amelyet a program 60-as szám esetén egyvonalas c hangnak képez le, 69 esetén egyvonalas a -nak³. Mivel az egyvonalas a hang frekvenciája 440 Hz, a többi hang névleges frekvenciája egyszerűen számolható:

$$f_n = 440.0 \cdot 2^{\frac{n-69}{12}}, \quad (4.5)$$

ahol n a MIDI hangmagasság, a $2^{(n-69)/12}$ kifejezés pedig az a -hoz képesti frekvenciaeltérést adja.

A program feltételezi továbbá, hogy a hang valódi frekvenciája a névleges frekvencia tercsávjába esik, ezen a határon belül már maximumkereséssel megkereshető a valódi alaphfrekvencia indexe, a spektrum megfelelő értékei pedig megadják az amplitúdót és a fázist.

A további harmonikusok frekvenciája ennek ismeretében többszörözéssel meghatározható, helyük az előbbihez hasonlóan, lokális maximumkereséssel pontosíthatók. A program minden egyes harmonikusnál jel-zaj viszonyt számol, figyelembe véve a Blackman-ablak szivárgását. Egy lokális maximum spektrumkomponensnek minősül, ha jel/zaj viszonya 6 dB-nél nagyobb. Ha az algoritmus két egymást követő harmonikust zajosnak talál, úgy dönt, hogy „elfogytak” a domináns komponensek. A sípok analízise során ezek a beállítások a legtöbb esetben jó eredményt adtak. (Ugyanez a ciklus szűri ki a felfutási és lecsengési szakaszból a harmonikusokat, részletesen ez a következő fejezetben található.)

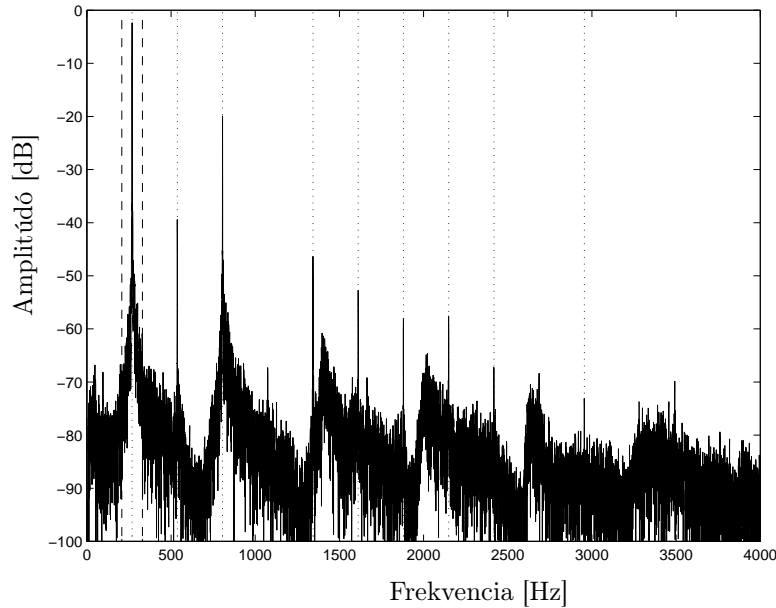
A spektrummeghatározó algoritmus kimeneti ábrája a 4.3 ábrán látható. A könnyű ellenőrzés érdekében a program kirajzolja a névleges frekvencia tercsávjának határait (pontozott-szagatott vonallal), továbbá megjelöli szagatott vonallal a megtalált harmonikus komponenseket. Amennyiben egy zajjal csatolt komponens ezzel a jel-zaj viszony feltétellel a program nem talál meg, akkor ezzel a komponens automatikusan zajsúccsá „alakul”.

4.2.2. Tranziens-modellezés

A sípok jellemzésénél, a 2.3.4. fejezetben megtalálható az orgonasípok tranziens jelenségeinek részletes jellemzése. Abban a szakaszban többféle lineáris jelfeldolgozási elem használatával sikerült belátni, hogy jó közelítés az orgonasípokot harmonikusok és zaj összegeként kezelni, és ez nem csak az állandósult, hanem a tranziens szakaszokra is igaz. Ily módon az is kiderült, hogy a berezgési és lecsengési folyamatok alatt dominánsan csak a harmonikusok amplitúdója változik.

A jelmodell alapú szintézis ezeket az amplitúdóváltozásokat burkológenerátorokkal tudja egyszerűen megvalósítani. A burkológenerátorok pedig – az előző szakaszban tárgyalt megfontolások miatt – gazdaságosan szűrők egységugrásaként valósíthatók meg. Az analízis során tehát egyrészt meg kell határozni a felharmonikusok

³Ez nem egzakt megoldás, mert a MIDI-kód a billentyűt azonosítja és nem a hangmagasságot, így pl. 4¹-es síp esetén a módszer egy oktávot téved. Ez helyes fájl-nevekkel megelőzhető. A CD-mellékleten lévő minták a program értelmezésének megfelelő nevet kaptak.



4.3. ábra. *Fafedett* síp megtalált komponensei

burkolóit, másrészt egy megfelelő algoritmussal az így kapott görbékre „ugrásválaszt” kell illeszteni.

További megfontolást igényel a burkolót előállító szűrők típusának meghatározása. Mivel a sípok valódi fizikai rendszerek, berezgésük exponenciális jellegű, amelynek digitális modellje a végtelen impulzusválaszú (IIR) szűrő. Az IIR szűrő z -tartománybeli átviteli függvénye a következő [Fodor94a]:

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}}, \quad (4.6)$$

ahol n a nevező illetve a szűrő fokszáma, m a számlálóé, b_i és a_i pedig a számlálóban és nevezőben lévő polinomok együtthatói. A szűrő fokszáma határozza meg a szűrő pólusainak számát (n). Minél nagyobb a szűrő fokszáma, a szűrő annál inkább formázható, tervezhető mind idő- mind pedig frekvenciatartománybeli specifikációk alapján, ugyanakkor megvalósítása csak egyre nagyobb költséggel tehető meg. Hatékony modellhez tehát meg kell határozni azt a legkisebb fokszámot, amely a burkolók domináns jellemzőit redundancia nélkül megvalósítja.

A sípharmonikusok burkolóira három ilyen jellemző definiálható, amelyek jól látszanak a 34. oldalon, a 2.17. ábrán. A görbék mindenképpen 0-ból indulnak (kivéve azokat a komponenseket, amelyek a környezeti zajjal összemérhetők), legtöbbjük nulla meredekséggel, továbbá némelyik egyszeri túllendülést is mutat. A kisebb amplitúdójú komponenseken megjelenő nagyfrekvenciás összetevő a zaj jelenlétére utal, megvalósítása burkolóként nem szükséges (nem is gazdaságos, egyszerűbben előállítható additív zajként, amelyet a következő szakasz tárgyal). Kísérletsorozattal könnyen megállapítható, hogy a domináns jellemzők megvalósításához minimálisan harmadfokú szűrőre van szükség, ezért a jelmodell burkológenerátorait harmadfokú IIR-szűrőkként érdemes realizálni.

A burkolók meghatározásához először ki kell szűrni a sípjelből a felharmonikusokat. Az alakhú átvitel érdekében a kifejlesztett MatLab-program ezt lineáris fázisú FIR-szűrők segítségével hajtja végre. Az egyes komponensek frekvenciáit a program már korábban meghatározta, a szűrőtervezés a MatLab beépített ablakos szűrőtervezési módszerével történik (`fir1.m`) [Mitra93]. A tervezett szűrő sáv szélessége az alapharmonikus függvényében változó, de egy sípon belül állandó⁴. A program a szűrés után a kapott harmonikusok amplitúdó-burkolóját Hilbert-transzformáltjuk abszolút értékeként határozza meg⁵ [Randall87].

A jelmodell a harmonikusokon kívül definiál egy „maradékjelet”, amely a síp zaj modelljét valósítja meg. Ezt a jelet a program az eredeti jel és a szűrt harmonikusok különbségként határozza meg, különbségképzéskor figyelembe véve a FIR-szűrők késleltetését. A szűrők sáv szélessége nem végtelenül kicsi, az ily módon meghatározott jel tehát nem teljesen pontos, a zajtartalom változását azonban jól érzékelteti. A maradékjel burkolója nem állítható elő Hilbert-transzformációval, mivel nem harmonikus, a program ezért a zaj „csúszóablakos szórását” számolja ki, ami annyit jelent, hogy egy adott hossznyi zajkomponensnek számolja ki a szórását, és ennek változását jeleníti meg.

A továbbiakban meg kell találni az így kapott burkolókhöz legjobban illeszkedő harmadfokú IIR-szűrő paramétereit. Erre az egyik – elterjedtebb – megoldás valamilyen frekvenciatartománybeli szűrőtervezési módszer használata. Vitathatatlan, hogy a frekvenciatartománybeli tervezésbeli módszerek nagyon kidolgozottak, és elméleti hátterük is tisztázott, a program mégsem ezt alkalmazza. Ennek oka az, hogy a leírt jellemzők (kezdeti nulla meredekség, túllövés az ugrásválaszban) frekvenciatartománybeli megfelelőik nehezen találhatók meg, nehezen definiálhatók. A program ezért időtartománybeli módszert használ a szűrőegyütthetők optimalizálására. A feladat komplexitása miatt ezt egy külön alprogram számítja (`tr_ident.m`), amelyet a főprogram hív meg. A domináns változások kiemelésére illetve a nagyfrekvenciás zaj eltüntetésére minden harmonikus-burkolón „csúszóablakos átlagolása” történik.

Az együtthetők optimalizálására Prony időtartománybeli szűrőtervezési algoritmus használható. Az eredeti algoritmus az impulzusválasz alapján tervez szűrőt, a (4.6) egyenletben bemutatott átviteli függvényt írja fel speciális formában. Ismert, hogy

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}, \text{ továbbá } H(z) = \sum_{i=0}^{\infty} h_i z^{-i}, \quad (4.7)$$

ahol h_i reprezentálja az impulzusválasz i -edik mintáját. Az első egyenlet átrendezése

⁴A hallás szempontjából a frekvenciafüggő relatív sáv szélesség lenne indokolt, mivel azonban a felharmonikusok amplitúdója kicsi, az ily módon nyert felharmonikusok nagyon zajosak lennének. A másik indoka a sípon belül állandó frekvenciájú szűrőnek, hogy így biztosítható egyszerűen az, hogy a tervezett FIR-szűrő 0 dB-es átvitele pontosan a felharmonikus frekvenciáján legyen, a felbontási pontosságon (0.33 Hz-en) belül.

⁵A transzformáció csak periodikus jelekre ad pontos eredményt. Mivel az egyes felharmonikusok szűrés után jó jel-zaj viszonyú szinuszelekkeként jellemezhetők, ezért használható.

után a

$$B(z) = H(z)A(z) \quad (4.8)$$

összefüggést kapjuk, amely nem más, mint a konvolúció z -tartománybeli definíciója. Ez a konvolúció az impulzusválasz első $k + 1$ elemének felhasználásával mátrixszorzatként a következőképpen írható fel:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & & \\ h_2 & h_1 & h_0 & & \\ \vdots & & & & \vdots \\ h_m & & & & \\ h_{m+1} & & & & \\ \vdots & & & & \\ h_k & & \dots & & h_{k-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Ez a mátrix felfogható hipermátrixként is, és így módon részmátrixokra bontással, $k = m + n$ esetén megoldható. Jelen esetben m és n egyaránt három, tehát az algoritmus közvetlen alkalmazása az impulzusválasz első 6 pontjára ad pontos megoldást, utána pedig semmilyen információt nem ad meg a módszer, akár instabil szűrőt is tervezhet⁶. A Prony módszer nagyobb pontszámra csak hibaminimalizálással adhat kielégítő eredményt [Mitra93].

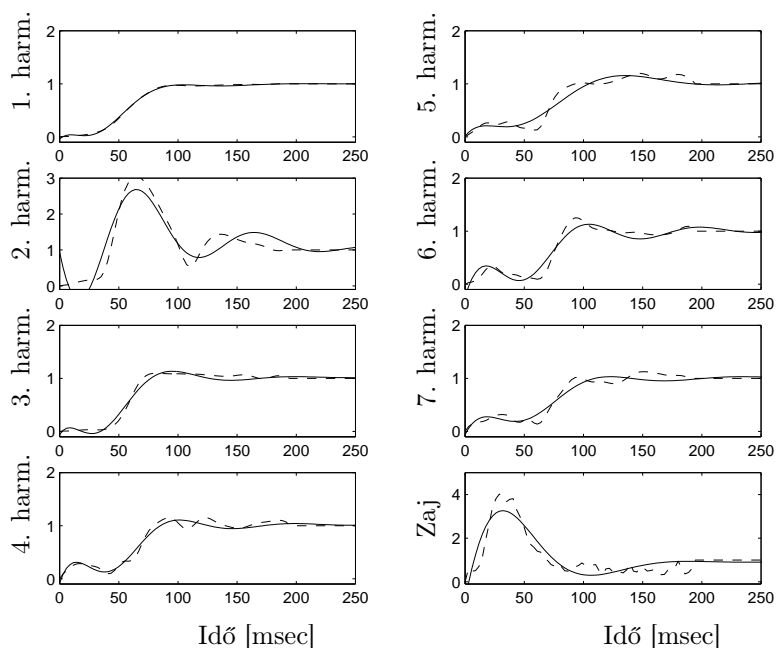
A MatLab-ban a Prony-féle algoritmust implementálták, olyan környezetben, amely egyrészt lehetővé teszi az ugrásválaszra történő optimalizálást, továbbá a Steiglicz-McBride iterációt használja a nagy pontszámú ugrásválasz minél pontosabb és hatékony közelítésére (stmcb.m). Az algoritmus a jobb konvergencia érdekében a burkolónak csak minden 128. pontjával hívja meg a függvényt, ezt a szintézisnél is figyelembe kell venni. Amennyiben a kapott együtthatók 16-bites pontossággal⁷ ábrázolva nem adnak stabil szűrőt, a program két további (nagyobb pontszámú) átlagolással próbálja az együtthatókat optimalizálni, végül a meghatározott burkolókat – az átlagoltakkal együtt – az egyszerű vizuális értékelhetőség érdekében kirajzolja. Az algoritmus segítségével optimalizált együtthatókkal kapott szűrők ugrásválasza és az átlagolt eredeti burkolók láthatók a 4.4. ábrán.

Jól látható, hogy az algoritmus a fent jellemzett belső paramétereivel jó eredményt ad a példabeli sípra. Probléma lehet a nagyon lassan megszólaló komponensekkel, ahol a véges szóhossz miatti kerekítés hatására a szűrőpólusok egységnyi amplitúdójúak lesznek⁸. Iterációs probléma pedig a nagyon zajos, kis amplitúdójú komponensek esetén lehet, amikor a legjobb szűrőparaméterek instabil szűrőt eredményeznek. Ilyenkor az adott harmonikus komponenst nem érdemes megvalósítani, vagy egyszerűen egy másik burkoló paramétereivel kell vezérelni.

⁶Az időtartománybeli módszerek hátránya, hogy nem a zérusokat és pólusokat optimalizálják, hanem az együtthatókat, a stabilitás tehát külön vizsgálendő.

⁷A valós-idejű szintézis fixpontos jelprocesszorának ábrázolási pontossága.

⁸Nagyon lassú beállítás esetén $|\lambda_i|$ nagyobb, mint $1 - 2^{-15}$, amely érték egy 16 bites fixpontos processzor maximálisan ábrázolható pozitív száma [Naszáros98].



4.4. ábra. *Principál* síp tranziens berezgései (szaggatott vonal) és az illesztett szűrők ugrásválasza (folytonos vonal)

Ezzel a módszerrel egyértelműen leírhatók az orgonasípok felharmonikusainak berezgési tranziensei, illetve a zajtartalom változása. A pólusok és a zérusok kirajzolásával kép kapható a tranziensek frekvenciafüggéséről, billentésfüggéséről, illetve arról, hogy egy síp megszólalása mennyire idővariáns.

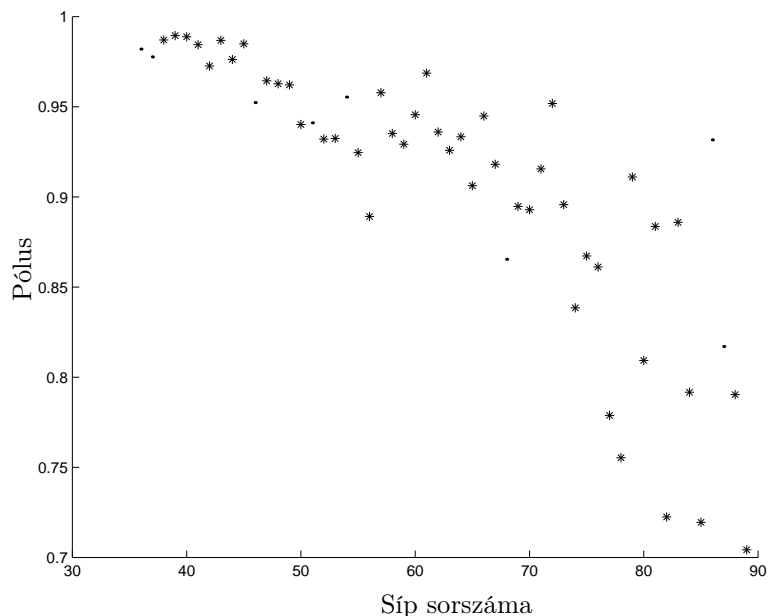
A 4.5. ábra példaképpen a császári *Principál* regiszter alapharmonikus-burkolóinak frekvenciafüggését mutatja be. Jól látható, hogy a berezgés egyre gyorsabb, vagyis az időállandót meghatározó pólusok abszolút értéke a frekvencia növekedésével csökken. A frekvencia-tengely logaritmikus, a pólusok lineáris ábrázolásban láthatók.

Megjegyzendő, hogy a program a lecsengésekre ugyanezzel a módszerrel illeszt burkolót. Mivel ott nem jelentkezik túllövés, és a zajtartalom sem befolyásolja annyira a tranzienseket, az algoritmus kevesebb hibával találja meg ezeket a komponenseket.

4.2.3. A jellegzetes sípjaj modellje

A 2.3.3. szakasz részletesen foglalkozott a sípok hangjában megtalálható zajkomponensekkel és pszichoakusztikai fontosságukkal. A jelmodellbe ez a jellemző a harmonikusoktól független zajként integrálható.

A zajcsúcsok detektálása több lépésből áll. A sípjaj analíziséhez önmagában a spektrum meghatározása már elég, mivel a jellemzők (amplitúdó-arányok, a diszkrét komponensekhez való viszony, stb.) az állandósult spektrumból könnyen detektálhatók. A szintézishez szükséges paraméterek kinyerése azonban több jelfeldolgozási



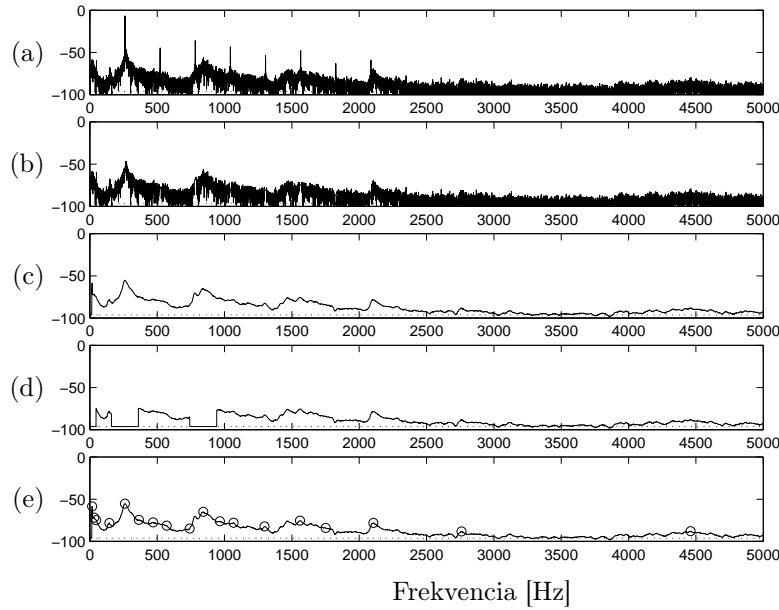
4.5. ábra. *Principál* regiszter alapharmonikus-beregzésének frekvenciafüggése (*, ·: a maximális komplex illetve valós pólus)

problémát is felvet. Az algoritmus működése, az egyes megvalósított részegységek a 4.6. ábrán nyomonkövethetők, az egyes lépéseket rendre a következő bekezdések tárgyalják.

Első lépésként a zajkomponenseket el kell választani a diszkrét, harmonikus komponensektől. Az előző fejezetben részletezett indokok miatt erre a feladatra nem alkalmazható a harmonikusok szűrése, a csatolt zajcsúcsok miatt. Jobb eredményt ad, ha a program a diszkrét komponensek helyére a környező spektrumkomponensek amplitúdói alapján becsült zajt tesz. A megtalált diszkrét komponensek környezetét olyan mértékben kell eltávolítani, hogy a spektrum előállításánál használt ablakozó függvény szivárgásának hatása sem maradjon a zajspektrumban, ugyanakkor a diszkrét komponensekkel csatolásban lévő zajcsúcsok még megmaradjanak. A diszkrét komponensek kiváltása ennek megfelelően lineáris interpolációval történik. Az így módon megmaradt zajspektrum látható a 4.6b ábrán, *Bourdon* síp esetén.

A zajcsúcsok pontosabb megtalálása érdekében a program átlagolja a kapott zajspektrumot. Az emberi fül számára a relatív sávzélességű átlagolás lenne indokolt, tehát nagyfrekvencián nagyobb átlagolási ablakkal. Egyszerűsége – és az orgona-sípban megtalálható nagyfrekvenciás zajkomponensek hiánya – miatt a program fix ablakozással számítja ki az átlagot. Az átlagolt zajspektrum látható a 4.6c ábrán, *Bourdon* síp esetén.

Az így meghatározott zaj egyes csúcsai rezonáns szűrőkkel valósíthatók meg.



4.6. ábra. Egy Bourdon síp zajparamétereinek származtatási lépései (a) teljes spektrum (b) zajspektrum (c) átlagolás (d) csúcskeresés (e) megtalált csúcsok

Egy másodfokú analóg rezonáns szűrő átviteli függvénye a következő [Fodor94b]:

$$W(s) = k \frac{\frac{s}{\omega_0}}{1 + 2\zeta\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2} \quad (4.10)$$

$$|W(f)| = |k| \frac{\frac{f}{f_0}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta\left(\frac{f}{f_0}\right)\right)^2}}, \quad (4.11)$$

ahol a három változtatható paraméter a k erősítési tényező (gain), a ζ csillapítási tényező és az ω_0 körfrekvencia. A szűrő jellegzetessége, hogy 0 Hz-en nem visz át, 6 dB/oktávós meredekséggel éri el az ω_0 frekvencia környezetét, ott a ζ csillapítási tényező függvényében kiemel, majd -6 dB/oktávós meredekséggel vág le. A csillapítási tényező szabályozza a szűrő sávszélességét is.

A szűrőparaméterek könnyen kifejezhetők a zajcsúcs három paramétere, a maximális amplitúdója (A_z), frekvenciája (f_z) és sávszélessége segítségével. A sávszélességhez meg kell határozni a szűrő maximális átvitelének 50%-ánál (A_{-6}) lévő valamelyik frekvenciát (felső vagy alsó töréspontot)⁹. Mivel a szűrő frekvenciatartományban logaritmikusan szimmetrikus (ugyanolyan meredekséggel éri el a maximumot, mint ahogy levág), a program – önkényesen – a felső -6 dB-es töréspontot keresi meg. Ezt a frekvenciát f_{-6} -tal, illetve a zajcsúcs frekvenciájához való viszo-

⁹Az irodalomban a 71%-os, -3 dB-es érték a szokásos. Itt azonban az a cél, hogy minél szélesebb sávban jól közelítsük a szűrőt, ezért van „lejjebb” definiálva a sávszélesség.

nyát $r_f = f_{-6}/f_0$ -al jelölve, felírható a következő négy egyenlet:

$$f_0 = f_z \quad (4.12)$$

$$A_z = |W(f_0)| = \frac{|k|}{2\zeta} \quad (4.13)$$

$$A_{-6} = \frac{A_z}{2} = |W(f_{-6})| = |k| \frac{\frac{f_z}{f_0}}{\sqrt{(1 - (\frac{f_z}{f_0})^2)^2 + (2\zeta(\frac{f_z}{f_0}))^2}}, \text{ vagyis} \quad (4.14)$$

$$\frac{A_z}{2} = |k| \frac{r_f}{\sqrt{(1 - r_f^2)^2 + (2\zeta r_f)^2}}. \quad (4.15)$$

Ezekből közvetlenül, illetve némi átrendezéssel megkapható f_0 , ζ , illetve k :

$$\begin{aligned} f_0 &= f_z \\ \zeta &= \left| \frac{(1 - r_f)(1 + r_f)}{2\sqrt{3}r_f} \right| \\ k &= 2\zeta A_z. \end{aligned} \quad (4.16)$$

A program ennek megfelelően először egy ciklusban megkeresi a maximális csúcsokat, oly módon, hogy egy megtalált csúcs mellett egy – a frekvenciatartománybeli hallásfeldésnek megfelelő [Tarnóczy82] – sáv szélességben lévő további zajkomponenseket elnyomja. Az algoritmus egy közbenső állapotát mutatja a 4.6d ábrarészlet, továbbá a megtalált csúcsokat a 4.6e ábra.

A (4.10) egyenletben megadott analóg szűrő együtthatói a kapott paraméterekkel a következőképpen írhatók le:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_a &= [0 \quad k\omega_0 \quad 0] \\ \mathbf{a}_a &= [1 \quad 2\zeta\omega_0 \quad \omega_0^2]. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Ezeket a paramétereket transzformálni kell s -tartományból z -tartományba (mivel a rendszer alapvetően diszkrét idejű), amely a bilineáris transzformáció segítségével könnyen elvégezhető [Mitra93].

Ezzel a program a zaj jellemzőit kb. 10-18 rezonáns szűrő paramétereként meghatározza, szűrőnként 3 paraméterrel.

4.2.4. A vizsgált külső hatások modellje

Amint már a pszichoakusztikus jelenségeket tárgyaló fejezet megállapította, a külső hatások nem vizsgálhatók egy síp közeltéri felvételéből, ezért a kifejlesztett analízis program ezeket nem vizsgálja. Modellbe történő integrálásukhoz hangjellemzők nem szükségesek, a hangforrások független pozíciója a regiszter és a síp ismeretében könnyen kiszámolható.

Jelöljük $A, B, C \dots$ betűkkel a regisztereket úgy, hogy az A regiszter legyen a homlokzatban, mögötte rendre a többi. A regiszterek száma legyen N . A sípokot lássuk el sorszámokkal, legcélszerűbb a billentyűzet szerint sorszámozni, pl. a

MIDI-kódok szerint. Egy 8'-as regiszter ezek után a 36. sorszámmal kezdődik, és 61 billentyű esetén a 96. sorszámmal végződik. Tételezzük fel továbbá, hogy a C-, Cisz-oldal kialakítása a „háztető” (\wedge) alakzatnak megfelelő, tehát a legmélyebb sípok vannak középen. Az orgona mátrixstruktúrája ekkor a következőképpen néz ki („felülnézetből” ábrázolva az orgona belsejét):

$$\begin{bmatrix} N95 & \dots & N37 & N36 & \dots & N96 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ C95 & \dots & & & & C96 \\ B95 & B93 & \dots & & \dots & B96 \\ A95 & A93 & \dots & A39 & A37 & A36 & A38 & \dots & A34 & A96 \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

Jól látszik, hogy három paraméter, a C-, Cisz-oldal kiosztása, a regiszter sorszáma és a síp sorszáma ismeretében egy síp pozíciója egyértelműen megadható¹⁰. Az analízis program ezt nem számolja ki, így módon a szintézis során tetszőleges belső elrendezésű orgona kialakítható.

A sípok paramétereit kiszámító program tehát a zajmodell meghatározása után a kinyert paramétereket elmenti egy `temp.mat` fájlba, amelyet utána egy DOS batch fájl meghívásával átnevez `%d.mat` névre, ahol `%d` a MIDI hangmagasság kódja (amely megegyezik a feldolgozandó fájl nevével (`%d.wav`)). A program a futás közben kiírt információit `%d.log` fájlba is elmenti, az adminisztráció megkönnyítése érdekében.

4.2.5. Hiányzó sípok paramétereinek becslése

Nem várható el, nem is lehetséges, de nem is szükséges egy teljes regiszter jelmodell alapú szintéziséhez az összes síp hangját felvenni és elemezni. Az alapfrekvenciától való függés vizsgálatával és összefüggések megállapításával elegendő lehet ritkábban mintát venni és a felvett sípok között hiányzó sípok paramétereit becsülni.

Vigyázni kell azonban arra, hogy a sípok egyedi karaktere, egyéni jellege egy ilyen „uniformizálás” során ne vesszen el. Ennek figyelembevétele az egyes sípok regiszterkarakterisztikához képesti szórásának figyelembevétele modellezhető.

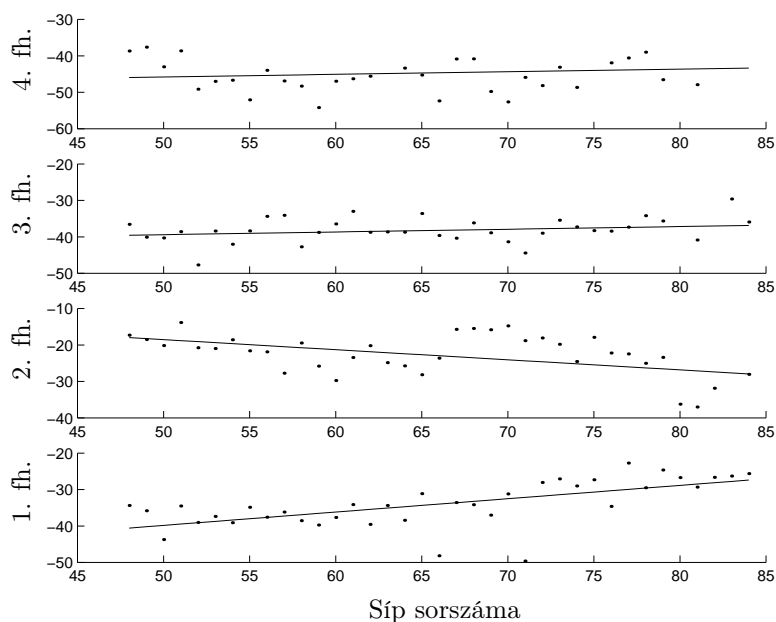
Ennek érdekében a két teljesen felmért regiszter minden sípjának mintájával lefutott az előző fejezetekben részletesen leírt program. Az így kapott paraméterek frekvenciafüggésének megvizsgálásával, illetve az egyéni paraméterek szórásának megállapításával a többi regiszter hiányzó sípjainak paramétereit pótolhatóak hasonló jellegű frekvenciafüggést mutató értékekkel.

Az egyik ilyen jellegzetesség a sípok hangnyomásának frekvenciafüggése, vagyis az, hogy hogyan változik a sípok hangereje. Ennek precíz méréséhez hiteles erősítő, kalibrált mikrofonok és jól definiált sípszáj-mikrofon távolságok kellenek, amelyek közül egyik sem volt biztosítható (2.3.1. szakasz), így tehát ennek vizsgálatáról

¹⁰Valódi orgonákon a helyszűke vagy egyéb ok miatt néha nem ennyire tiszta a struktúra, ennek modellezésétől azonban eltekinthetünk.

le kell mondani. Szakirodalmi megfontolások szerint a sípok teljesítménye a frekvencia függvényében közel egyenes marad, nagyfrekvencián egy kicsit csökken [Angster90], modellezése tehát ily módon történhet.

Mérhető viszont a felharmonikustartalom változása a frekvencia függvényében. Amint arról már szó volt, fedett és nyitott sípokra ez különbözőképpen alakul, ezért mindkettőre meg kell vizsgálni. A 4.7. ábra *Bourdon* sípsor frekvenciakomponenseinek változását, a 4.8. ábra pedig *Principál* sípsor hasonló jellegzetességét mutatja.

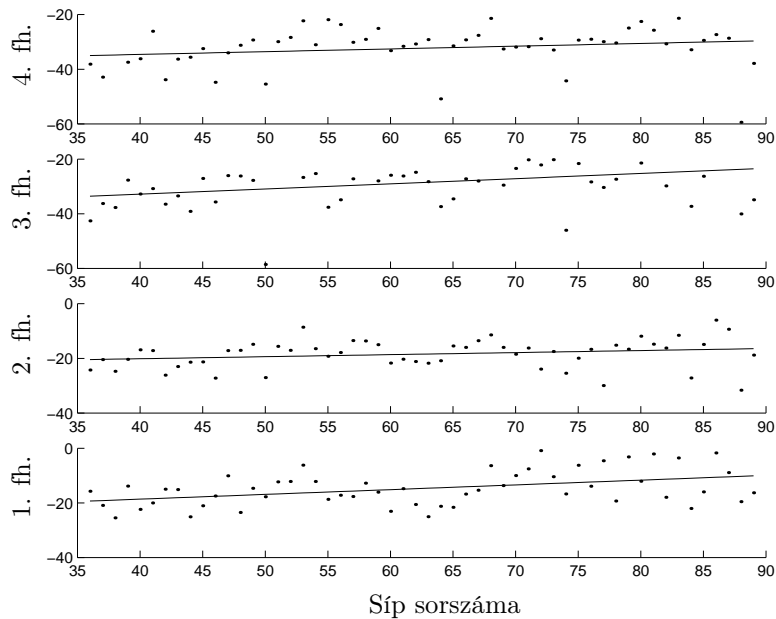


4.7. ábra. *Bourdon* regiszter spektrumkomponenseinek változása az alapfrekvencia függvényében

A spektrumkomponensek dB-ben lineáris függést mutatnak az alapfrekvencia logaritmikus változása esetén. Ennek megfelelően egy egyenes illeszthető az egyes komponensek változásának mértékére, ily módon hiányos sípfelvételek hasonlóan határozhatók meg. Az egyes harmonikusokra illesztett regressziók szórását a 4.1. táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat. A komponensek szórása

Felharmonikus	Szórás (dB)	
	<i>Bourdon</i>	<i>Principál</i>
1.	4.8564 dB	5.8560 dB
2.	5.4445 dB	5.1872 dB
3.	3.2609 dB	8.0726 dB
4.	4.4698 dB	7.3986 dB



4.8. ábra. *Principál* regiszter spektrumkomponenseinek változása az alapfrekvencia függvényében

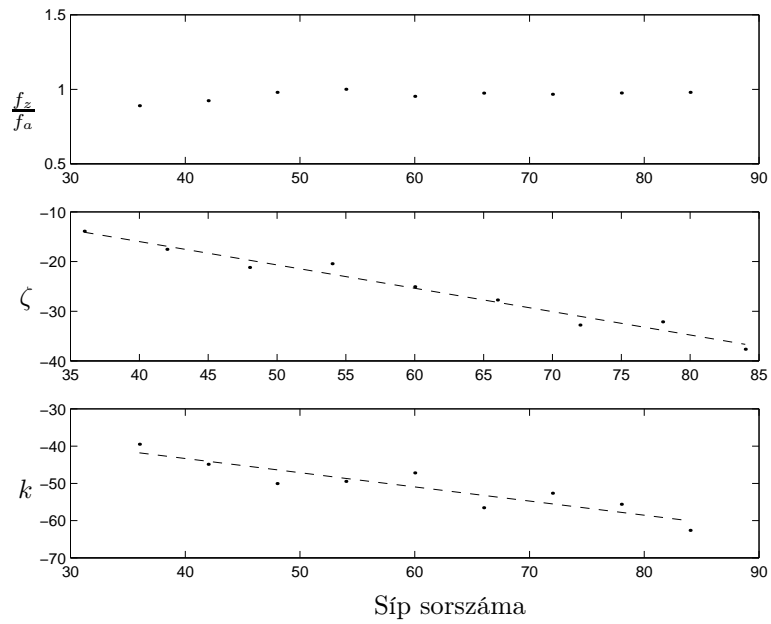
A dB-ben megadott szórás közepesnek mondható. Ez lehet az egyik „felelőse” a sípok egyedi karakterének, tehát hasonló módon figyelembe veendő hiányzó sípok amplitúdóbecslésénél. Az is látható, hogy a kisebb amplitúdójú komponensek erősebben szórnak, ez a fizikai rendszerből következik, hiszen jobban terheltek zajjal.

A sztochasztikus paraméterek frekvenciafüggését is fontos ismerni. Ez könnyen definiálható a zajcsúcsok három paraméterének, az amplitúdójuk, szélességük és frekvenciájuk változásaként. A sípok analízise során megállapítást nyert, hogy a zajcsúcsok csatolási viszonyai megmaradnak, ezt támasztja alá a 4.9a ábra, amely a legnagyobb zajcsúcs alapfrekvenciához való viszonyát ábrázolja *Fafedett* regiszter esetén. Ugyanezen ábra (b) és (c) része mutatja a sáv szélesség és a relatív amplitúdó nagyságát, dB-ben mindkettő lineáris függést mutat.

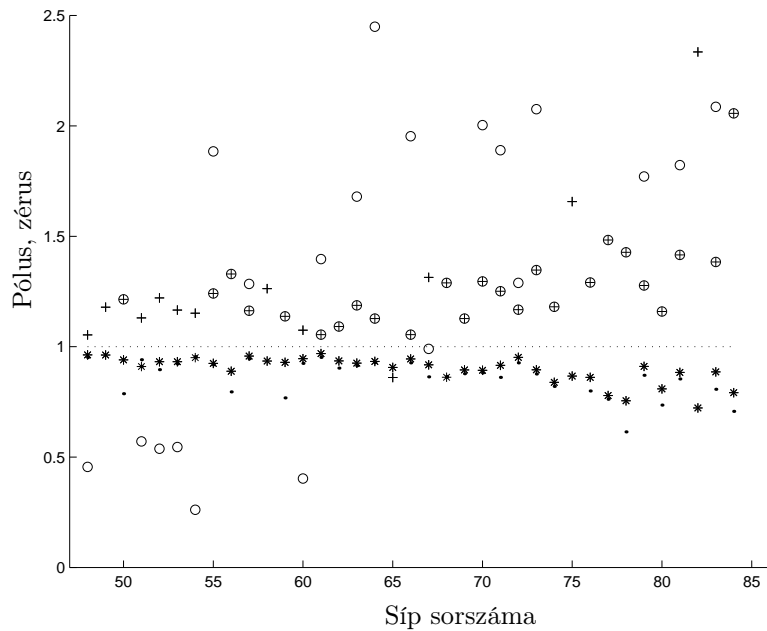
A tranziens jellemzők változása az utolsó, amelyet vizsgálni kell hiányzó sípparaméterek becsléséhez. A megfelelő ábrák az egyes harmonikusok pólusainak és zérusainak változását mutatják a frekvencia függvényében (4.10., 4.11. ábrák).

Jól látszik az a fizikai jelleg, miszerint a pólusok értéke egyre csökken, tehát a beállási idők is egyre kisebbek, egyre gyorsabban felépül a síphang. Kétszeres frekvenciához körülbelül feleakkora beállási idő tartozik. A paraméterek szórása is elég nagy, a hang felépülése sem szigorúan specifikált. Kisebb amplitúdójú (zajos) komponensekre a tendencia nem nagyon észlelhető, ennek oka az, hogy a burkoló-illesztő algoritmus ilyenkor a zajra optimalizálja az adott komponens burkolóját.

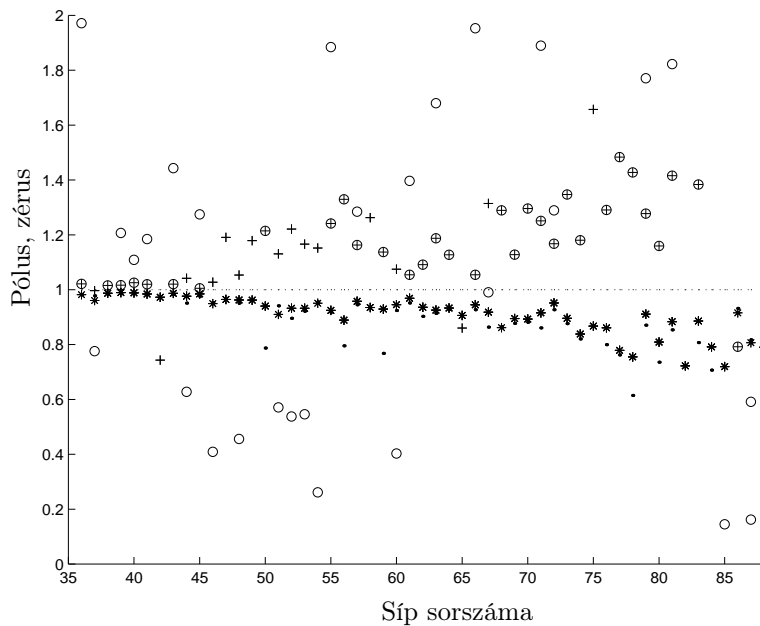
Ezen megfontolások és eredmények felhasználásával lehetséges pótolni hiányzó sípok paramétereit. A meglévő sípfelvételekből 9 minta (5 C-síp és 4 Fisz-síp) áll rendelkezésre, ezen minták paramétereit alapján könnyen készíthető olyan program, (*parest.m*), amely előállítja a köztes sípok paramétereit. Zajos komponenseknél cél-



4.9. ábra. *Fedett* regiszter domináns zajcsúcsának frekvenciaingadozása, valamint sávzélesség- és amplitúdóváltozása az alapfrekvencia függvényében



4.10. ábra. *Bourdon* regiszter berezgésének változása az alapfrekvencia függvényében (*: komplex pólus, ·: valós pólus, +: komplex zérus, o: valós zérus)



4.11. ábra. *Principál* regiszter berezgésének változása az alapfrekvencia függvényében (*: komplex pólus, ·: valós pólus, +: komplex zérus, o: valós zérus)

szerű pl. az alapharmonikus megfelelő paramétereivel helyettesíteni, vagy a komponst kihagyni.

4.3. A jelmodell szimulációja

Az előző alfejezet lépésről lépésre meghatározta a jelmodell alapú szintézis paramétereit. Ezeket megfelelő `mat`-fájlokként mentette el, ezáltal az egyes sípok jellemzőinek helyigényét csökkentve.

A szintézis – az alapos elméleti megfontolások ellenére – csak akkor meggyőző, ha jól is szól, vagyis, ha hanghűsége nemcsak elméletileg, hanem gyakorlatilag is teljesül. Ehhez a szintézist meg kell valósítani.

A jelmodell alapú szintézis szimulációjára (off-line megvalósítására) készült a `soundgen.m` MatLab-program. Mivel a szintézis hangszerként csak valós időben használható, ezért a szimulációs program nincs teljes dallamok lejátszására optimalizálva, hanem csak egy – elméletileg tetszőleges hosszúságú – hangot tud generálni, a megfelelő paraméterfájl segítségével.

4.3.1. A szimuláció vezérlése

A program MIDI-kódok alapján vezérelhető. Egyszerű demonstrációk hanganyagának elkészítéséhez készült egy C-program (`mid2m.exe`), amely MIDI-fájlból egy vezérlő `m`-fájlt generál. Az `m`-fájl tartalmazza a kiszámítandó hangok sorszámát (1.. N), hosszát (ezredmásodpercben), továbbá MIDI-kódját, betölti a kódnak meg-

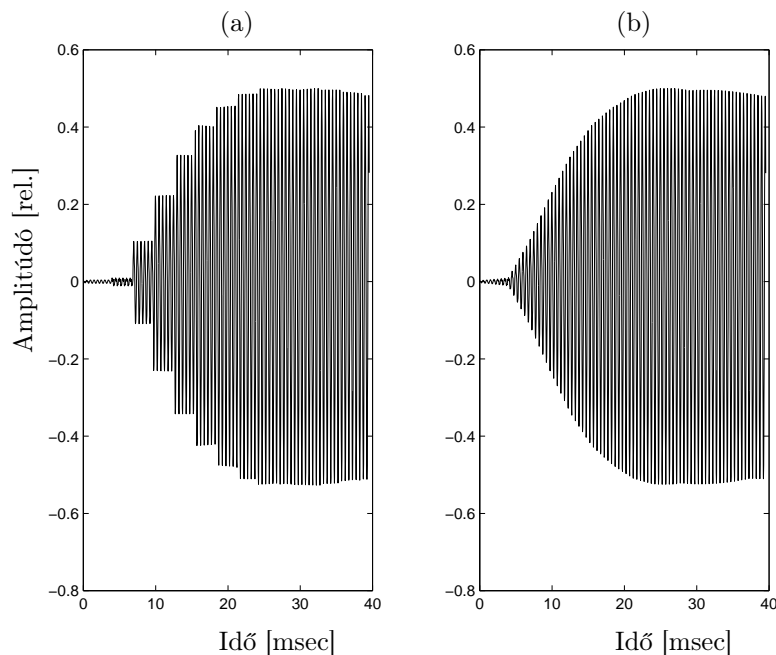
felelő hang paramétereit és minden hangra meghívja a fenti hanggeneráló programot (a programok használatára egy példa található az F.3. függelékben). Az előálló hang `%i.wav` néven kerül mentésre, ahol i a hang sorszáma.

4.3.2. A diszkrét komponensek előállítása

A szimulációs MatLab-program a diszkrét komponenseket az alapfrekvencia ismeretében állítja elő, a beépített `sin.m` függvény segítségével. Az előállított hang hossza az előírt hossz, plusz további 300 ezredmásodperc, amely a síp lecsengését fogja tartalmazni (a MIDI-fájl ugyanis a hangesemény be- és kikapcsolási idejét tartalmazza, a lecsengés nem számít bele).

4.3.3. Burkolóillesztés

Ugyanebben a ciklusban kerül sor a burkolók illesztésére. A paraméterek származtatásánál láttuk, hogy az átlagolt burkolóknak csak minden 128. pontja számít bele a burkolót generáló szűrők paramétereinek meghatározásába. Ennek megfelelően, csak akkor kaphatunk helyes időállandókat, ha (azonos mintavételi frekvencia esetén) a szűrőkimeneteket is csak minden 128. lépésben frissítjük. Két frissítés között nulladrendű tartás vagy lineáris interpoláció lehet az egyszerű megoldás. A kétféle lehetőség kimenetét mutatja a 4.12. ábra. Mivel a nulladrendű tartóval történő megoldás erős nemlineáris torzítást okoz a jelben, ezért a szimulátor program (és a valós idejű program is) lineáris interpolációt alkalmaz két burkolófrissítés között.

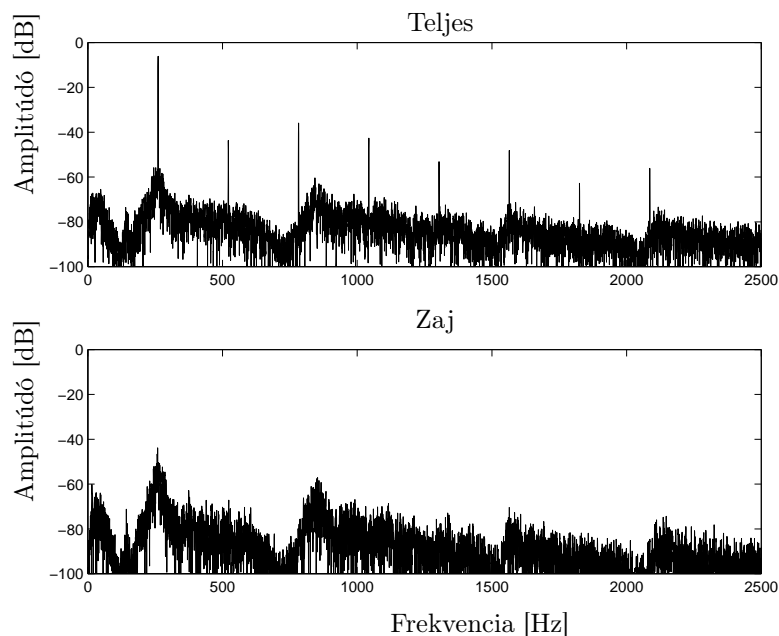


4.12. ábra. Modellsíp berezgése (a) nulladrendű tartók (b) lineáris interpoláció alkalmazása esetén (zaj nélkül)

A burkoló a digitális szűrőegyütthetők segítségével, a MatLab `dstep` utasításának segítségével állítható elő. A berezgési tranziens burkolója a bekapcsolási triggerjeltől a kikapcsolási jelig tart, kikapcsoláskor a lecsengési tranziens szűrőegyütthetőivel oldja meg a program a lecsengetést, szintén lineáris interpolációt alkalmazva két szűrőkimenet frissítése között.

4.3.4. A zaj implementálása

A MatLab szimulációs program implementálja a sípokra jellemző zajcsúcsokat is. Ehhez a MatLab `randn` utasításával állít elő fehérzajt, majd az egyes zajcsúcsokat szűrőkkel alakítja ki (filter utasítás) és a kapott csúcsokat összegzi. Modell *Bourdon* síp zaja (és teljes spektruma) látható a 4.13. ábrán.



4.13. ábra. Bourdon modellsíp teljes- és zajspektruma

Az így előállított zajt a jelhez képest megfelelő szintre normalizálja a program, burkolóit a harmonikusokhoz hasonló módszerrel beállítja, majd összegzi a hangjelet és a hozzá tartozó zajt.

4.3.5. A külső körülmények figyelembevétele

A program a külső hatások közül jelenleg a regiszteren belüli pozíciót veszi figyelembe, időkésleltetéses és intenzitásos sztereofóniával. A „modell-orgona” három méter széles, és a regiszterek a \vee alakú elrendezést követik, vagyis a legmélyebb sípok találhatóak a szélen, a legkisebbek pedig középen (ezek a paraméterek természetesen átírhatók, a programban megjegyzésként megtalálható az átírás módja).

A program a síp MIDI-kódjából kiszámolja a síp pozícióját, (C- vagy Cisz-oldal, távolság), majd ennek megfelelően beállítja a virtuális orgona két szélén lévő hangszóróhoz képesti késleltetését és amplitúdócsökkenését.

A kimenet tehát egy sztereó hangfájl, amely nevét a program a már említett sorszám alapján kapja. A kimeneti fájl-formátum 44100 kHz-es, 16 bites sztereó wave fájl.

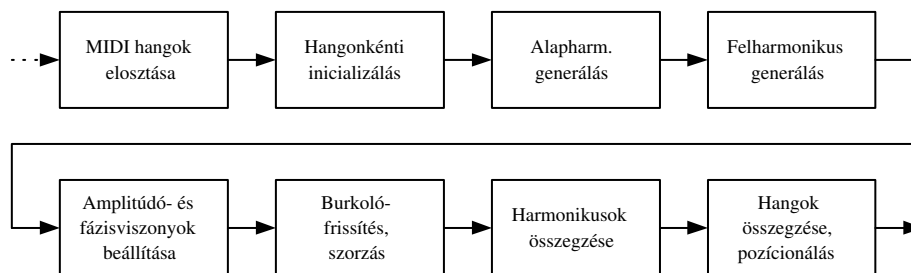
Amennyiben a programot a mid2m.exe fájl kimenetével vezéreljük, a kimeneti könyvtárban sorszám szerint megjelennek a MIDI-fájlban meglévő hangok. Ezeket valamilyen zenei szerkesztőprogram segítségével lehet kész dallá összeállítani.

4.4. Valós idejű implementáció

A jelmodell alapú szintézis valós idejű megvalósítása az, amivel a modell hanghűsége tényleg tesztelhető, továbbá hardverkölsége becsülhető. A mai személyi számítógépek (PC-k) teljesítménye lehetővé teszi, hogy ilyen rendszerre készüljön egy olyan program, amely képes valós-idejű szintézisre. A PC-k azonban több okból sem optimálisak a feladat megvalósítására. Egyrészt hangszerként való használatra nem gazdaságosak, továbbá azok a jelfeldolgozási elemek, amelyek a jelmodell alapú szintézisben használandók, nehezen, sok járulékos processzoridővel valósíthatók meg.

A jelmodell szintézisére célszerűbb digitális jelprocesszort (DSP-t) használni. A Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék DSP Laboratóriumában több ilyen, DSP-t tartalmazó jelfeldolgozó fejlesztői környezet is rendelkezésre áll. Audio célokra (hangszintézisre) mindegyik fejlesztőkörnyezet rendelkezik előnyökkel és hátrányokkal. A számítási igény nagyjából becsülhető volt, többek között ezért is végül egy Analog Devices termék, az ADSP-2181-es jelprocesszor segítségével készült el a valós idejű implementáció. A fejlesztőkörnyezet és a processzor részletesebb leírása az F.5. függelékben található.

Az elkészült program jelenleg a zaj implementációját még nem tartalmazza. A program 22050 Hz-es mintavételi frekvencián három síphangot tud egyszerre számolni, hangonként 8 harmonikkussal. A program felépítése a 4.14. ábrán látható.



4.14. ábra. A jelenlegi DSP-program működési blokkvázlata

A programot a DSP soros portjának megszakítási rutinja tartalmazza. Mivel a DSP-kártyán lévő DA átalakító a soros porton keresztül kommunikál a processzorral, ezért a program mintavételi időközönként fut le (az átalakító a mintavételi frekvenciának megfelelő időközönként okoz megszakítást).

Ez a fajta megoldás jellegzetes a DSP-k programozásánál. Ilyenkor a processzor először inicializálja a belső változóit, illetve a perifériákat, majd végtelen ciklusban várja a megszakításokat, és megszakítás esetén végrehajtja a következő hangminta kiszámítását, és kiküldi a kimenetre.

4.4.1. MIDI-parancsértelmezés

A DSP-kártya valós idejű (MIDI-billentyűzettel történő) vezérlésre nincsen felkészítve, ezért a jelenleg implementált program előre elkészített dallammal vezérelhető. Ez is – a szimuláció vezérléséhez hasonlóan – MIDI-fájlból állítható elő, a `mid2dsp.exe` program segítségével. A DSP számára egy hangesemény – a MIDI rendszerhez hasonlóan – egy be- vagy kikapcsolási információból („mi a teendő”), a hangmagasságból („melyik paraméterrendszert kell használni”), és egy hangerő értékből áll („milyen hangerő paraméterrel”). A vezérlő fájlban ezen kívül egy változó jelöli a következő hangesemény bekövetkezésének relatív időpontját.

Ezen paramétereket tartalmazza a program dallamvezérlő táblázata `melody.tbl`, amelyet a DSP ciklikusan játszik le. Ennek a tárolási módszernek előnye az, hogy valós idejű vezérlés esetén a kód nagyon könnyen módosítható, hiszen a valódi MIDI-üzenetek is ilyen felépítésűek [Sík92].

4.4.2. Dinamikus erőforráskiosztás

Egyszerű, egyszólamú dallamok dallamtáblája felváltva egy be- és egy kikapcsolás üzenetből áll. Az orgona azonban tipikusan nagyobb polifónia fokú hangszer. Ilyenkor sűrűn előfordul az, hogy egy már szóló hang mellé nyom le az orgonista egy következő billentyűt, vagyis egy bekapcsolási eseményt még egy bekapcsolási esemény követ.

Ehhez egyrészt meg kell oldani azt, hogy a program több hangot is elő tudjon állítani, valamint el kell döntenie, hogy melyik erőforrás (hanggenerátor) szabad a következő hangnak. Ha pedig nincsen szabad generátor, a legrégebben szólót kell elhallgattatnia.

Ehhez a program kétszeres hierarchiájú számlálórendszerben számolja az időt. Az egyik számláló (`countirq`) a két burkolófrissítés közti megszakításokat számolja, a másik számláló (`count`) pedig a relatív időt (ez utóbbi végeredményben a `countirq` számlálási periódusidejét számolja). A `count` számláló a következő MIDI-esemény bekövetkezéséig hátralévő időt tartalmazza. Amennyiben dekrementálás után nulla, be kell tölteni a következő MIDI-eseményt.

A kikapcsolás MIDI-esemény egyszerű, csak a megfelelő táblázatban az adott hang hangerejét kell 0-ra állítani, a lecsengés automatikusan elkezdődik¹¹. Ha új hangot kell megszólaltatni, a program a három lehetséges hanggenerátorból megkeresi azt, amelyik legrégebben változott. A „régiség” eldöntése minden MIDI-esemény beérkezésekor megnövelt számlálók segítségével történhet. A megtalált pozíció helyére bekerül az új hang paramétere (MIDI-kód), illetve hangereje átállítódik egy nullától különböző értékre, így a következő megszakításban már el is kezd szólni.

A számlálóbetöltések és az esetleges MIDI-üzenet feldolgozás után a program háromszor lefutó ciklusban számolja ki a három generátor hangját. A következő fejezetekben leírt programrészletek tehát háromszor futnak le minden megszakításkor.

4.4.3. Alapharmonikus előállítás

Az egyes hanggenerátorok egy megszakításban először a megszólaltatandó hang alapharmonikusát állítják elő. Ez többféleképpen is megtehető, a periodikus jelmodell alapkoncepciójának megfelelően a feladat mind idővariánsan, mind pedig időinvariánsan megoldható. Időinvariáns esetben a rezonáns szűrőt (lásd a 4.1. ábrát, az 52. oldalon) rendszeregyenlete alapján közvetlemül megvalósítják. A másik (idővariáns) megoldásban a bázisfüggvényt táblázat formájában, adott pontossággal adják meg, kiolvasásnál a köztes elemeket valamilyen interpolációs eljárással pontosítják.

A modell implementációjánál mindkét megoldás tesztelésre került. Az időinvariáns megoldás könnyen, kevés utasításból megvalósítható, hátránya, hogy az így előálló szinuszjelek tisztasága az elméleti lehetőséghez képest kicsi¹². A táblázatos módszer – mivel a kerekítési hibák nem kumulálódnak – némi többletszámítás árán 80 dB tisztaságú szinuszt állít elő.

Ennek megfelelően a program szinusztáblából interpolálja az alapharmonikus aktuális értékét. Először frissíti a hang pillanatnyi fázisát, majd az új fázisnak megfelelő szinusz- és koszinusz függvény értékét számolja ki. Amennyiben a fázisnak megfelelő érték nem található meg a táblában, a szinusz függvény Taylor-soros közelítésének megfelelően interpolálja az értékeket:

$$\begin{aligned}\sin(\alpha_0 + \varepsilon) &= \sin \alpha_0 \cos \varepsilon + \cos \alpha_0 \sin \varepsilon \approx \sin \alpha_0 + \varepsilon \cos \alpha_0 \\ \cos(\alpha_0 + \varepsilon) &= \cos \alpha_0 \cos \varepsilon - \sin \alpha_0 \sin \varepsilon \approx \cos \alpha_0 - \varepsilon \sin \alpha_0.\end{aligned}\tag{4.19}$$

Önmagában a jelhez nem kell mind a két komponens, a következő fejezetben azonban kiderül, hogy két szempontból is hasznos előállítani.

4.4.4. Felharmonikusok generálása

A felharmonikusokat is elő lehetne állítani az előbbi módszerrel, ez azonban gazdaságtalan megoldás. Célravezetőbb és számítástechnikailag sokkal hatékonyabb az

¹¹A jelenleg implementált program nem tesz különbséget a felfutás és a lecsengés között, mindkét esetben a berezgési szűrőparamétereket használja. Ennek elsősorban helymegtakarítási oka van.

¹²Ismert, hogy $n = 16$ biten a maximális jel-zaj viszony kb. $6n = 96$ dB. A módszerek 40 dB tisztaságú szinuszt tudtak előállítani.

egyes komponensek koszinuszát rekurzív szorzat segítségével előállítani a következőképpen:

$$\begin{aligned}
\cos(2\pi n\omega_0 t) &= \operatorname{Re}\{e^{j2\pi n\omega_0 t}\} = \\
&= \operatorname{Re}\{e^{j2\pi(n-1)\omega_0 t} e^{j2\pi\omega_0 t}\} = \\
&= \operatorname{Re}\{(\cos(2\pi(n-1)\omega_0 t) + j \sin(2\pi(n-1)\omega_0 t)) \times \\
&\times (\cos(2\pi\omega_0 t) + j \sin(2\pi\omega_0 t))\} = \\
&= \cos(2\pi(n-1)\omega_0 t) \cos(2\pi\omega_0 t) - \sin(2\pi(n-1)\omega_0 t) \sin(2\pi\omega_0 t).
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Ehhez szükségünk van az alapharmonikus szinuszán kívül az előző harmonikus szinuszára is, ezért azt is elő kell állítani hasonlóan:

$$\sin(2\pi n\omega_0 t) = \cos(2\pi(n-1)\omega_0 t) \sin(2\pi\omega_0 t) + \sin(2\pi(n-1)\omega_0 t) \cos(2\pi\omega_0 t). \tag{4.21}$$

A harmonikusok szinuszának és koszinuszának előállítása az amplitúdó- és fázisviszonyok beállításakor is csökkenti a számításigényt. Ezek meglétével az állandósult állapotbeli relatív amplitúdók és fázisok ugyanis a következőképpen állíthatók be:

$$\begin{aligned}
A_n \cos(2\pi n\omega_0 t + \varphi_n) &= \operatorname{Re}\{A_n e^{j2\pi n\omega_0 t + \varphi_n}\} = \\
&= \operatorname{Re}\{A_n e^{\varphi_n} e^{j2\pi n\omega_0 t}\} = \\
&= \operatorname{Re}\{(A_n \cos \varphi_n + j A_n \sin \varphi_n) \times \\
&\times (\cos(2\pi n\omega_0 t) + j \sin(2\pi n\omega_0 t))\} = \\
&= A_n \cos \varphi_n \cos(2\pi n\omega_0 t) - A_n \sin \varphi_n \sin(2\pi n\omega_0 t).
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Ehhez csak annyival kell többet tenni a paraméterek előkészítése során, hogy A_n és φ_n helyett $A_n \cos \varphi_n$ -t és $A_n \sin \varphi_n$ -t kell eltárolni.

A programban ennek megfelelően így kerülnek kiszámolásra mind a harmonikusok, mind pedig a relatív amplitúdók és fázisok.

4.4.5. Burkolóillesztés

A program mindegyik harmonikusra illeszt burkolót. A szakasz első részében már említett számlálók értékétől függően, egy adott megszakításban vagy lineáris interpolációt végez, vagy pedig szűrőkimenetet frissít.

A burkolók frissítése a burkolókat generáló szűrők rendszeregyenlete alapján közvetlenül történhet. A rendszeregyenlet alapján kiszámoljuk a következő értéket, majd az értékeket eggyel „öregbítjük”:

$$\begin{aligned}
y_n &= b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2} - a_1 y_{n-1} - a_2 y_{n-2} \\
y_{n-2} &= y_{n-1} \\
y_{n-1} &= y_n \\
x_{n-2} &= x_{n-1} \\
x_{n-1} &= x_n.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Ebből is látható, hogy az x_n változó felhasználható kapcsolójelnek, az egységugrás segítségével egy síp hangja egyszerűen ki- és bekapcsolható (Az együttthatók frissítésénél természetesen ügyelni kell arra, hogy az y_n értékek felharmonikusanként különbözök, azok változását felharmonikusanként kell tárolni, az x_n értékek csak síponként frissítendőek).

Amikor nincs szükség együtttható-frissítésre, a rendszer lineáris interpolációt számol két burkolóegyütttható között. A program a következő képletet alkalmazza:

$$y = k_1 y_{n-1} + k_2 y_n, \quad (4.24)$$

ahol y_n és y_{n-1} a burkológenerátor két utolsó eltárolt kimenete, k_1 és k_2 pedig változók, amelyek a `countirq` számláló értékétől függően súlyozzák a két burkolóértéket.

4.4.6. A külső körülmények figyelembevétele

A program a külső körülményeket közül egy egyszerű modellt alkalmaz a sztereó tér megvalósítására, a C- és Cisz oldal elkülönítésére. Minden egyes hangnál vizsgálja a MIDI-hangjegy páros illetve páratlan voltát, és ennek megfelelően a jelet vagy a bal, vagy pedig a jobb oldalra teszi ki. Ez egy eléggé elnagyolt közelítés, előnye, hogy egyszerűen megvalósítható.

4.5. Az implementációk minősítése

Vizsgálva a jelmodell alapkoncepcióját, jól látható, hogy végeredményben a rendszer alapvetően párhuzamos struktúrájú, azaz hatékonyan ugyanazon műveleteket végző elemek párhuzamos működésével lenne megvalósítható.

Az utóbbi két alfejezetben bemutatott szimuláció és főként a valós-idejű implementáció alapvetően soros rendszerű. Ezért nagyon sok erőforrást, időt elvesz a programok ciklusszervezése, a változók mentése, egyszerűen az „adminisztráció”. Ennek köszönhető, hogy az – egyébként jó paraméterekkel rendelkező – DSP is az egyes elemek egyszerűsége ellenére csak három hang kiszámítására képes, hangonként 8 harmonikussal, zaj nélkül, 22050 Hz-es mintavételi frekvencia esetén. Valamilyen párhuzamos architektúra a feladat megoldására alkalmasabb lenne, a rendelkezésre álló fejlesztőeszközök között ilyen azonban nem volt.

A DSP-program hármass polifónia-foka miatt, illetve a dinamikus erőforráskiosztás miatt már egy kétszólamú orgonaműnél is megfigyelhető pattogás. Ennek oka az, hogy *legato* játékmód miatt egybeérő hangoknál az erőforrás-kiosztó algoritmus egy új hang beérkezésekor a legrégebben szóló hangot kikapcsolja, ilyenkor az nem tud lecsengeni. Nagyobb teljesítményű processzoron, nagyobb polifónia-fokkal a jelenség nem lenne észlelhető.

5. fejezet

Összefoglalás

A dolgozat előző fejezetei a hangok jellemzőivel, az orgona hangjával, modellezésének ismert lehetőségeivel, továbbá jelmodell alapú szintézisével foglalkoztak. Az irodalom tanulmányozása és a szintéziskísérlet eddigi eredménye sok érdekes, eddig nem tárgyalt jelenségre hívta fel a figyelmet, másrészt bizonyos hiedelmek eloszlátását is elősegítette.

5.1. Eredmények

Az irodalom régóta tartó tanulmányozásának és a jelmodell alapú szintézis kimenetének egyik legérdekesebb tanulsága az, hogy egy élethű, jó minőségű hangszermodell létrehozása során nem a modell általános koncepciójának felállítása és megvalósítása a legnehezebb feladat. Sőt, a létrejövő hang minőségét, a közelítés pontosságát sem feltétlenül az alapötlet fogja meghatározni. Sokkal fontosabb – s ugyanakkor lényegesen nehezebb is – a hangszer pszichoakusztikai szempontból fontos paramétereit megtalálni, objektíven megadni, valamint a hangszer és a modell paramétere közötti transzformációkat megtalálni.

Ugyanakkor az is tény, hogy élethű hang szintéziséhez – függetlenül a modellezési eljárástól – mindenképpen tanulmányozni kell a hangszer által generált hang keletkezésének, létrejöttének körülményeit, a modellezendő hangszer fizikai paramétereit is. Csak ily módon érhető el ugyanis az, hogy a szintetizált hang paramétere az eredeti hangszeréhez hasonló struktúrával, súlyozással szerepeljenek. Egy ilyen módon létrehozott modell hangja sokkal természetesebb lesz, és sokkal árnyaltabban tudja megvalósítani a modellezendő hangszer hangját azokkal a szintézisekkel szemben, amelyeknél hasonló vizsgálatot nem végeztek.

Ezek szerint tehát egy jó szintézis létrehozása előtt egy hangszer pszichoakusztikai szempontból fontos paramétereit körültekintő analízissel meg kell határozni. Ennek az az előnye is megvan, hogy az analízis eredményeivel objektíven vizsgálható bármilyen szintézis hangminősége, de csak akkor, ha az analízis valóban meghatározza és megfelelő súlyozással veszi figyelembe az egyes pszichoakusztikai paramétereiket.

A kapott analízis eredményekkel vizsgálva a már létező szintézis kísérleteket, kiderült, hogy némelyik – elterjedtsége ellenére – nagyon kevés hallásorientált jellemzőt vesz figyelembe. Más szintézisek pedig, amelyek a pszichoakusztikai jellemzőket – legalábbis elméletileg – maradéktalanul megvalósítják, egészen más jellegű (megvalósítási, paraméter-transzformációs) problémákat vetnek fel.

A vázolt okok támasztják alá a jelmodell alapú szintézis vizsgálatának jogosságát. Az orgonasípok hangjának vizsgálatánál kiderült, hogy a lineáris megközelítés – bár „elavultnak” tűnik – használható. A jelmodell paramétereinek megválasztása pedig illeszkedik a pszichoakusztikai jellemzőkhöz, ezért jó hanghűséget kell biztosítani. A CD mellékleten található audio anyagok hangja – főként a MatLab program kimenete – orgonaművészek véleménye szerint is igen meggyőző.

A bevezetett jelmodell – amely végeredményben a klasszikus additív szintézis továbbfejlesztése – több előnnyel is rendelkezik a mintavételes (PCM) szintézishez képest. Egyik előnye az, hogy a sztochasztikus jellemzőket is magában foglalja, ezáltal a keletkező modell hangja mindenképp változatosabb lesz. Ezen kívül a modellben könnyedén figyelembevehető illetve megvalósítható a paraméterek vezérlés- illetve időfüggése (amennyiben például a berezgés billentésfüggő, akkor ez a burkológenerátorok paraméterváltoztatásával könnyen figyelembevehető, továbbá, ha egy paraméter nagy szórást mutat, akkor az hasonló szórással megvalósítható). Az ily módon (sok „véletlen”, illetve vezérlésfüggő elemmel) megvalósított hang minden egyes megszólalása az eredeti sípokhoz hasonlóan egyedi lesz. Hasonló eredményt a tárgyalt szintézisek közül csak a fizikai modell tud előállítani (alapkonceptió szintjén), a jelmodell alapú szintézis elemei azonban kisebb hardverigénnyel megvalósíthatók.

Az is belátható azonban, hogy a jelmodell alapú szintézis a PCM szintézissel szemben nem veheti fel a versenyt, annak ellenére, hogy egy síp paramétereinek tárolásához lényegesen kevesebb memória kell, mint mintáihoz. Ennek oka az, hogy számításigénye jóval nagyobb, mint a PCM szintézisé. Nagyobb tételben, megfelelő párhuzamos architektúrákkal versenyképesebb lehetne, a jelenlegi piac nagy része viszont nem igényli a PCM-nél intelligensebb módszerek széles körű elterjedését (pl. fizikai modell alapú hangszer is nagyon kevés van).

5.2. Továbbfejlesztési lehetőségek

A jelmodell elméleti megalapozása teljesnek mondható, a hozzátartozó analízis és szintézis feladatok azonban csak részlegesen kidolgozottak.

Az analízis feladatok közül a modellparaméterek szórásának precízebb leírása, a tranziens jelenségek alatt történő fázis- és frekvenciaváltozások vizsgálata még nem részletezett, pedig ezek a jellemzők egyszerűen beépíthetők a jelmodellbe.

A jelenlegi implementációk eléggé leegyszerűsítettek. A valós időben működő program pedig különösen az, mivel nincsenek benne azok a paraméterek, amelyek a jelmodell előnyét jelentik a PCM szintézissel szemben (zaj, paraméterváltozás). A jelmodell szimulációja, a MatLab program több paramétert megvalósít, különösen

a sípzaj az az elem, amelyet orgonaművészek is pozitívan értékelnek¹. Egyik sem veszi figyelembe a nyitott sípok két végén történő sugárzást, a többszöri megszólalás paraméterváltozását, a Mitnahme-effektust, és a zajtartalom megszólalás közbeni arányváltozását. Ezen jelenségek nagy részét azonban már analizálni sem sikerült a rendelkezésre álló mérőrendszerek pontatlansága miatt.

Összességében a szintézis – annak ellenére, hogy sok paramétert nem vesz figyelembe – már így is meggyőző minőséget produkál. Éppen ezért, érdekes kísérlet lehet a jelmodell alapú szintézis más hangszerekre történő adaptálása is. Természetesen egy ilyen megvalósításhoz az adott hangszernél is hasonló mélységű analízis vizsgálatot kellene végezni. Emellett van még néhány olyan szempont, amely érzékeltetheti, hogy más hangszerekhez lényegesen bonyolultabb vezérlési struktúrát kellene megvalósítani, ahhoz képest, mint amilyen orgonáknál került alkalmazásra. Azoknál a hangszereknél, amelyeknél folyamatos az emberi vezérlés, a paraméterek állandósult állapotbeli módosításának lehetőségét is integrálni kell a modellbe (pl. hegedű), impulzusgerjesztésű hangszereknél a lecsengési szakaszban jó közelítést adhat a fix paraméterkészlet. Egy másik probléma a szabályozható gerjesztésű hangszereknél a modellparaméterek változása a gerjesztés függvényében, amely pl. zongoránál nemlineáris is lehet. Orgonasípnál mindkét hatás elhanyagolható volt, míg más hangszereknél pontosan ezek a paraméterek határozzák meg a keletkező hang karakterét.

Mivel a szintézis orgonára jó minőségű, ezért az imént vázolt nehézségek ellenére (illetve figyelembevételükkel) mindenképpen érdemes lehet a modellt más hangszerekre is kiterjeszteni, főként olyanokra, amelynek jó közelítéssel lineáris viselkedésűek, illetve emberi vezérlési lehetőségük korlátozottabb. Ilyenek lehetnek a fúvós hangszerek, vagy esetleg a Hammond-orgona(!) hasonló modellje.

¹PCM szintéziseknél sokszor kiszűrjük az állandósult állapotból a sípzajt, mivel nagyon hallatszik rajta a speciális tárolásból eredő minőségromlás.

Irodalomjegyzék

Könyvek

- [Albert86] Albert P., „*Die elektronische Synthese von Orgeltönen*” Verlag Erwin Bochinsky (Das Musikinstrument), Frankfurt am M., 1986.
- [Douglas68] Douglas, A., „*The Electronic Musical Instrument Manual*” Pitman, London, 1968.
- [Ellenhorst82] Ellenhorst, W., „*Handbuch der Orgelkunde I–II.*” Frits Knuf, Buren, 1975.
- [Ferenczy97] Ferenczy P., „*Video- és hangrendszerek*” egyetemi jegyzet (51418), harmadik utánnomás, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997.
- [Fletcher91] Fletcher, N.H., Rossing, T.D., „*The Physics of Musical Instruments*” Springer-Verlag, New York, 1991.
- [Fodor94a] Fodor Gy., „*Hálózatok és rendszerek analízise I.*” egyetemi jegyzet (55014), Műegyetemi kiadó, Budapest, 1994.
- [Fodor94b] Fodor Gy., „*Hálózatok és rendszerek analízise II.*” egyetemi jegyzet (55014), Műegyetemi kiadó, Budapest, 1994.
- [G. szótár] Soltész F., Szinyei E. (szerk.), „*Görög-magyar Szótár*” , 2. kiadás, utánnomás, Sárospatak, 1984.
- [Klotz72] Klotz, H., „*Az orgonáról*” (ford: Gergely F.), Zeneműkiadó, Budapest, 1972.
- [Kruza85] Kruza R., Banai G., „*A szintetizátor a zenei gyakorlatban*” Zeneműkiadó, Budapest, 1985.
- [Lajos98] Lajos T., „*Az áramlástan alapjai I–II.*” egyetemi jegyzet Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
- [Mitra93] Mitra, S.K., Kaiser J. F. (Ed.) „*Handbook for Digital Signal Processing*” John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.

- [Randall87] Randall, R.B., „*Frequency Analysis*” Brüel & Kjær, Helsinki, ISBN 87 87355 07 8, 1987.
- [Sík92] Sík Z., Gerényi G., „*MIDI alapozás, MIDI protokoll*” Pixel Graphics Kft., Budapest, 1992.
- [Tarnóczy82] Tarnóczy T., „*Zenei akusztika*” Zeneműkiadó, Budapest, 1982.
- [Tarnóczy86] Tarnóczy T., „*Teremakusztika*” Akadémiai kiadó, Budapest, 1986.

Disszertációk, diplomatervek

- [Angster90] Angster J., „*Orgona ajaksípok megszólalásának és rezgésének korszerű mérései és eredményei*” kandidátusi értekezés, MTA MMSz Akusztikai Kutatólaboratóriuma, Budapest, 1990.
- [Fürjes96] Fürjes A., „*Nyílt struktúrájú zenei hangszintézis digitális jelfeldolgozó processzorral*” diplomaterv, BME Elméleti Villamosság Tan-
szék, Budapest, 1996.
- [Koller91] Koller I., „*A Wigner-eloszlás és alkalmazása hangszugárzók mérés-
technikájában*” egyetemi doktori értekezés, BME Híradástechnikai Tan-
szék, Budapest, 1991.
- [Skordos95] Skordos, P.A., „*Modeling Flue Pipes: Subsonic Flow, Lattice Boltz-
mann and Parallel Distributed Computers*”, Technical report, Mas-
sachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1995.
- [Verge95] Verge, M-P., „*Aeroacoustics of Confined Jets*”, with application to
the Physical Modeling of Recorder-Like Instruments, Ph.D. Thesis,
Technische Universiteit Eindhoven, 1995.

Cikkek, konferenciaanyagok

- [Albert78] Albert P., „Az elektronikus orgonák korszerű áramkörei I-XXVII”
Rádiótechnika, 1976–78.
- [Albert87] Albert P., „Kísérlet az orgonahangzás elektronikus szintézisére I–IV.”
Kép- és hangtechnika 1980/3. 75–84. o., 1985/5. 137–142. o., 1986/5.
141–148 o., 1987/2. 33–41. o.
- [Angster93] Angster, J., Angster, József, Miklós, A., „Coupling between simulta-
neously sounded organ pipes”, *94th AES (Audio Engineering Society)
Convention (Preprint 3534)*, Berlin, 1993.

- [Angster96] Angster J., Miklós A., Fuchs H.V., „Untersuchungen an der Hildebrandt-orgel in Naumburg”, *Instrumentenbau*, 50/(9/10) (1993), 21–23. o.
- [Gruschka97] Gruschka, S., „Neueste Forschungsergebnisse in der Orgel- und Kirchenakustik”, *Das Musikinstrument*, 46/3 (1997), 34–41. o.
- [Péceli86] Péceli, G., „A common structure for recursive discrete transforms”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, CAS-33., 1035–36. o., 1986.
- [Piszczałski81] Piszczałski, M., Galler, B., Bossemeyer, R., Hatamian, M., Looft, F., „Performed music: analysis, synthesis and display by computer”, *JAES*, 29/(1/2) (1981), 38–55. o.
- [Smith93] Smith, J.O., „Digital Waveguide Modeling of Musical Instruments”, *CCRMA*, Stanford, draft 7/24/93, 1993.
- [Välimäki92] Välimäki, V., Karjalainen, M., Jánosy Z., „A real-time implementation of a flute modell”, *Proc. IEEE ICASSP '92*, San Francisco, 1992.
- [Verge93] Verge, M-P., Fabre, B., *et.al.*, „Jet formation and jet velocity fluctuations in a flue organ pipe”, *JAES*, 43/2 (1995), 1119–1132. o.

Előadás-sorozatok

- [Horváthné98] Horváth Istvánné, „*Műszaki akusztika*” előadássorozat, BME Híradástechnikai Tanszék, BME VIHI 4107, Budapest, 1998.
- [Illényi98] Illényi A., „*A jelfeldolgozás elemei II.*” előadássorozat, BME Távközlési és Telematikai Tanszék, BME VITT 4108, Budapest, 1998.
- [Kishonti96] Kishonti I., „*Hangmérnöki szakkollégium*” előadássorozat, BME Schönherz Zoltán Kollégium, Budapest, 1996.
- [Kovács98] Kovács I., „*Hangátviteli rendszerek*” előadássorozat, BME Híradástechnikai Tanszék, BME VIHI 4048, Budapest, 1998.
- [Naszádos98] Naszádos L., „*Jelfeldolgozó processzorok alkalmazása I.*” előadássorozat, BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék, BME VIMM 9318, Budapest, 1998.
- [Takács98] Takács F., „*Stúdiótechnika*” előadássorozat, BME Híradástechnikai Tanszék, BME VIHI 4109, Budapest, 1998.

Internet

- [A100 Man] Hammond Organ Factory, „Hammond A100 Manual”
URL: <http://www.theatreorgans.com/hammond/faq/a100.html>
- [Ahlborn] Ahlborn orgelbau, „Ahlborn profile”
URL: <http://www.generalmusic.com/company/profile/ahlborn.htm>
- [AKG] AKG Acoustics, „Studio Microphones C 747 COMB”
URL: <http://www.akg-acoustics.com/english/spec-c747.htm>
- [H. FAQ] Hammond Frequently Asked Questions
URL: <http://www.theatreorgans.com/hammond/faq/...>
- [H. List] Hammond Mailing List
hammond@home.ease.lsoft.com
- [Rodgers] Rodgers organs, „Paralell digital imaging”
URL: <http://www.rodgerscorp.com/features/pdi.html>

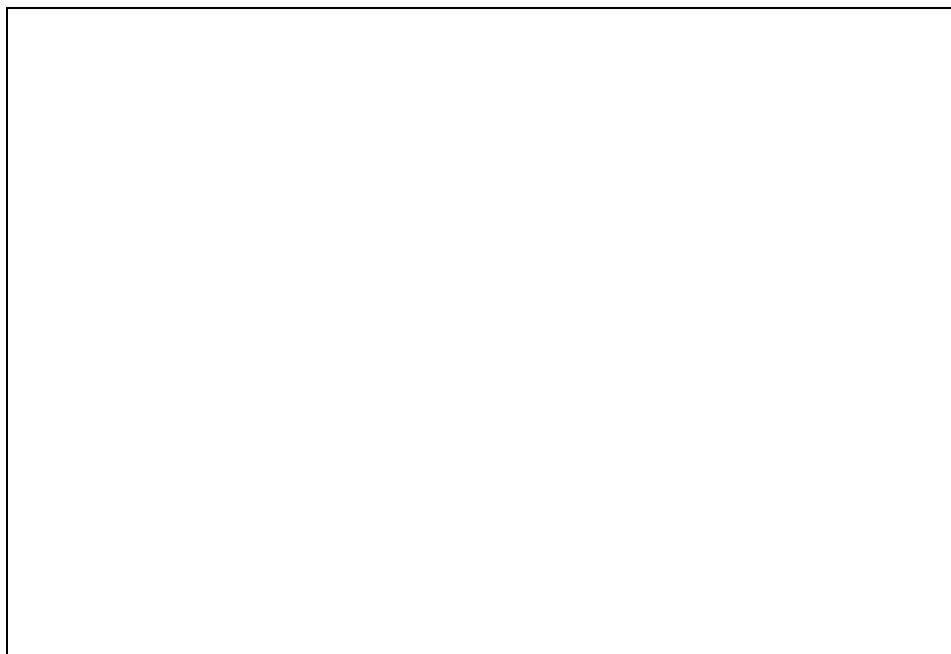
Egyéb források

- [AD95a] Analog Devices, Inc. „*Ez-Kit Lite Reference Manual*”, Analog Devices, Canada, 1995.
- [AD95b] Analog Devices, Inc. „*ADSP-2100 User's Manual*”, Analog Devices, Canada, 1995.
- [Akai] Akai Electric Co., Ltd. „*ACM-50 Electret Condenser Microphone*”, data sheet
- [Albert82] Albert P., „Hangszórók akusztikus rövidzár-jelenségének megszüntetésére alkalmas hangsugárzó megoldás” *Szabadalmi leírás* (G 10 B 3,16), 2251, 2514, 1982.
- [Gravis] Advanced Gravis Computer Technology Ltd., „*Gravis Ultrasound Plug & Play User's Guide*”, Appendix D (Technical Specifications), Gravis Ultrasound P&P CD-ROM, 1996.
- [Technics] Matsushita Electric Industrial Co., „*Technics RS BX-404 Stereo Cassette Deck Operating Instructions*”, Technical specifications, Japan, 1991.

Függelék

F.1. A mért orgonák leírása

F.1.1. Császár



F.1. ábra. A császári református templom orgonája kívülről

A császári orgona jellemzői:

- Felépítés: 2 manuál, 1 pedál (eredetileg 1 manuál, 1 pedál)
- Készítő: Szalay Gyula, Székesfehérvár, 1901
- Utolsó felújítás: 1978-80
- Traktúra: mechanikus
- Regiszterek

– I. manuál

- * *Principál* 8'
- * *Oktav* 4'
- * *Zergekürt* 8'
- * *Nasat* 2 2/3'
- * *Mixtura* 2' 1 1/3' 1'

– II. manuál

- * *Födött* 8'
- * *Fuvola* 4'
- * *Principál* 2'
- * *Cimbel* 1'

– Pedál

- * *Violonbass* 8'
- * *Subbass* 16'
- * *Korálsíp* 4'



F.2. ábra. A császári református templomi orgona sípjai

F.1.2. Naszály



F.3. ábra. A naszályi református templom orgonája kívülről

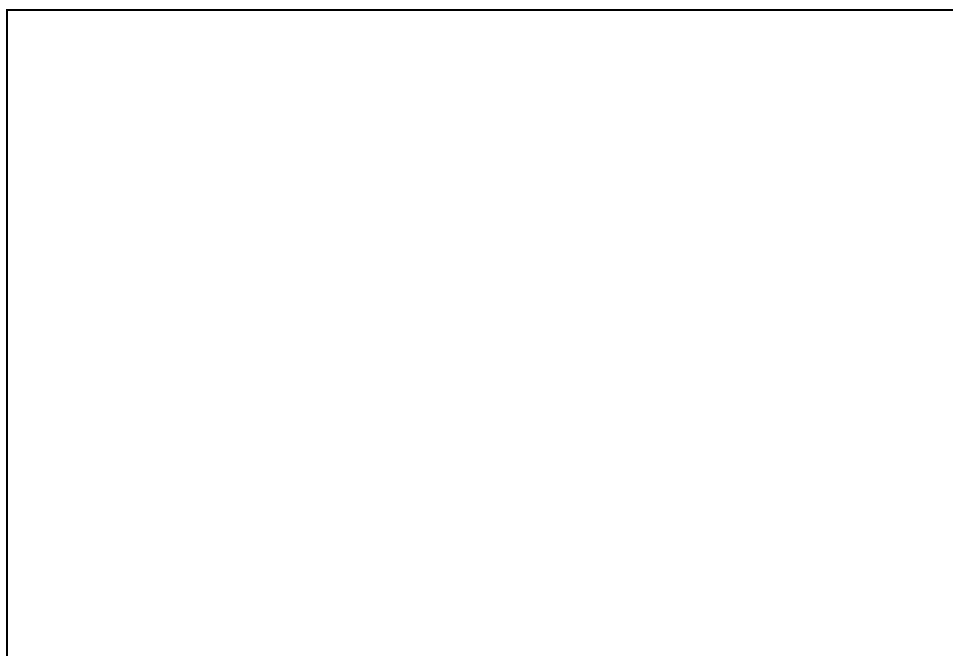
A naszályi orgona jellemzői:

- Felépítés: 1 manuál
- Készítő: Angster és Fia, Pécs, 1903
- Utolsó felújítás: 1996
- Traktúra: pneumatikus
- Regiszterek

* *Principál 8'*

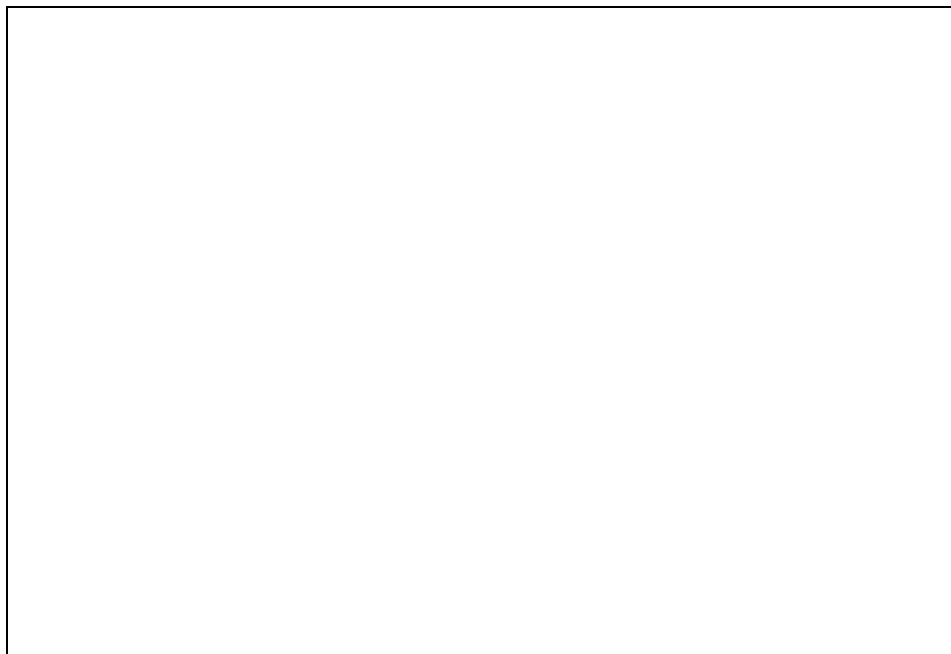
* *Principál 4'*

* *Bourdon 8'*



F.4. ábra. A naszályi református templomi orgona sípjai

F.1.3. Tata



F.5. ábra. A tatai református templom orgonája kívülről

A tatai orgona jellemzői:

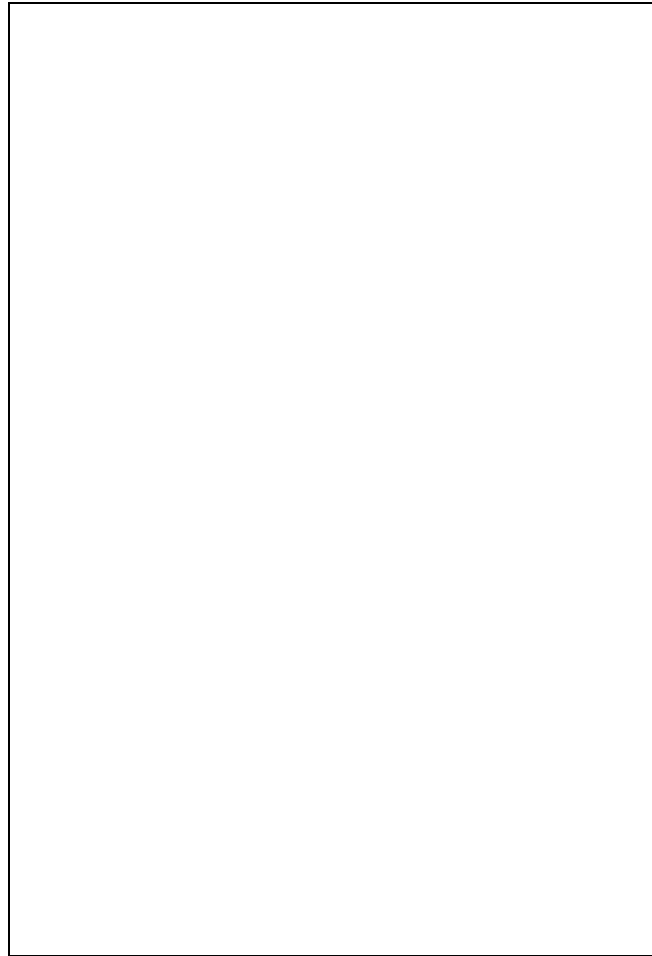
- Felépítés: 1 manuál, 1 pedál
- Készítő: Sachs János, Komárom, ~1850
- Utolsó felújítás: ~1960
- Traktúra: mechanikus
- Regiszterek

– I. manuál

- * *Principál* 4'
- * *Oktav* 2'
- * *Fafedett* 8'
- * *Quint* 2 2/3'
- * *Mixtura* 2' 1 1/3' 1'
- * *Pordün* 8'
- * *Erdei fuvola* 4'
- * *Fafuvola* 2'

– Pedál

- * *Violonbass 8'*
- * *Oktávbass 4'*
- * *Zübass 16'*
- * *Kornett 3 sor*



F.6. ábra. A tatai református templomi orgona sípjai

F.2. A mérőeszközök technikai adatai

A mérőeszközök kalibrálására és ellenőrzésére nem volt elérhető megfelelő műszerpark, így a specifikációs adatok a gyári adatlapok által megadott értékek.

F.2.1. Mikrofonok

Akai ACM-50

A mikrofon adatait az [Akai] adatlap tartalmazza (jelenleg már nem gyártják).

- Működési elv: Elektret kondenzátor mikrofon, 1.5 V-os AA elemmel működő beépített FET-es impedanciaillesztő fokozattal.
- Frekvenciaátvitel: 40 Hz - 16 kHz
- Érzékenység: -73 dB, 0 dB = 10 mV/pascal
- Impedancia: 600 Ω
- Iránykarakterisztika: Kardiod
- Jel-zaj viszony: ≥ 50 dB

AKG C-747

A mikrofon adatait az [AKG] adatlap tartalmazza.

- Működési elv: Kondenzátor mikrofon, fantom tápról működő beépített FET-es impedanciaillesztő fokozattal.
- Frekvenciaátvitel: 30 Hz - 18 kHz
- Érzékenység: 8.5 mV/Pa (-42 dBV)
- Impedancia: 400 Ω
- Iránykarakterisztika: Hiperkardiod
- Ekvivalens zajszint: 21 dB_{SPL}(A)
- Kivezérelhetőség 1% torzításnál: 133 dB_{SPL}

F.2.2. Technics RS BX-404 sztereó kazettás deck

A deck adatait a [Technics] adatlap tartalmazza (jelenleg már nem gyártják).

- Bemeneti érzékenység: 0.25 mV
- Névleges kimeneti jelszint: 400 mV
- Frekvenciaátvitel: 30 Hz - 20 kHz
- Kimeneti impedancia: 800 Ω

F.2.3. Gravis Ultrasound P&P hangkártya

A hangkártya adatait a [Gravis] adatlap tartalmazza (jelenleg már nem gyártják).

- Frekvenciaátvitel (-3 dB): 20 Hz - 20 kHz
- Sztereó áthallás: ≤ -50 dB
- Harmonikus torzítás (THD): ≤ 0.01
- Jel-zaj viszony (SNR): ≥ 75 dB
- Névleges bemeneti jelszint: -5 dBV_{rms}

F.3. A kifejlesztett programok használata

F.3.1. Az analízis program

Másoljuk a `h:\programs\matlab\anal` és `h:\programs\matlab\toolbox` könyvtárak tartalmát a `c:\temp` könyvtárba (h a CD-ROM meghajtó címkéje). Másoljuk hozzá a feldolgozandó fájlt (pl. `60.wav`). Ezután gépeljük be a következő utasításokat a MatLab parancssorba:

```
%analízis
cd c:\temp; %path
midinote=60; %hangmagasság
wavpath=""; %elérés
soundpar; %analízis program
```

Az analízis program lefutása során keletkezik 8 ábra, valamint 2 fájl a `c:\temp` könyvtárban, az egyik a `60.log`, amely a program képernyőre kiírt információit tartalmazza ASCII fájlként, a másik pedig a `60.mat`, amelyben a szükséges jelmodell-paraméterek találhatóak.

F.3.2. A MatLab szintézis-program

Másoljuk a `h:\programs\matlab\synth`, és a `h:\programs\matlab\toolbox` könyvtárak tartalmát a `c:\temp` könyvtárba. Másoljuk hozzá a kívánt hangmagasság paraméter-fájlját (`60.mat`). Ezután gépeljük be a következő utasításokat a MatLab parancssorba:

```
%szintézis
cd c:\temp; %path
midinote=60; %hangmagasság
load 60.mat; %paraméter-betöltés
length=3; %hanghossz másodpercben
seq_num=1; %sorszám
soundgen; %generátor program
```

A szintézis program lefutása során keletkezik egy fájl a `c:\temp` könyvtárban (`1.wav`), amely a kívánt hangmintát tartalmazza.

A `mid2m.exe` program segítségével vezérlő m-fájl készíthető a fenti program számára. DOS-parancssorba írjuk be a következő utasítást: `mid2m.exe bach.mid >vezer.m`, ezáltal az m-fájlban lesznek a fenti példa utasításai a MIDI-fájl tartalmának megfelelően sorszámozva. A MIDI-fájlnak megfelelő (0-ás) formátumban kell lennie, és csak hangeseményeknek szabad benne lennie, egyébként a program hibaüzenetet ad.

F.3.3. A valós-idejű DSP-program és kellékei

A valós idejű programot többféleképpen is lehet tesztelni. A legegyszerűbb a kézen lévő bemutató fájlok (*.exe) letöltése a DSP-könyvtárból EZ-KIT LITE DSP-kártyára. Ezek kimenete a mellékelt CD audio részén is megtalálhatók.

A másik lehetőség a dallamtábla lecserélése, ami szintén nem bonyolult. Ehhez először futtasuk a mid2dsp programot MS-DOS parancssorban: mid2dsp.exe bach.mid >melody.tbl, az így keletkező fájlban benne lesz a DSP-program vezérlő táblázata. Ezzel kell felülrni a DSP-program könyvtárában lévő dallamtáblát, továbbá a programban az n_note változónak be kell írni a hangok számát (amely megegyezik a MIDI-események számának felével, ez utóbbi pedig kiolvasható a melody.tbl fájlból).

```
{konstansok}

;                               {my constans, 3. sor}
.const n_harm=8;                 {Number of harmonics}
.const n_poly=3;                 {Number of the notes at the same time}
.const n_note=595;              {Number of the notes of the whole melody}
.const fresh_step=64;           {Envelope fresh step (depends on f_s)}
```

Ezután a DSP-programot újra kell fordítani az ADSP 2181-es processzorra, az adott fejlesztői környezetben.

A hangszíntáblák lecserélése bonyolultabb. A mat2dsp.m fájl egy %d.mat típusú fájlból hozzáfűzi a sound_d.tbl és sound_p.tbl fájlhoz a megfelelő paraméterlistát. Amennyiben tehát a megfelelő sorrendben hívjuk meg, létrejön a DSP-hez szükséges két paraméterfájl.

A rendszer fejlesztése, felhasználóbarátságának növelése még folyamatban van. Használatához célszerű tanulmányozni a MatLab fájlokat, a megjegyzések (kommentek) segítenek akár egyéb hangszerek modelljének létrehozásában is.

F.4. A CD-melléklet tartalma

F.4.1. Számítógépes adatok

A CD-n található számítógépes adatok könyvtárstruktúrája.

programs	(programok)
programs\dsp	(ADSP 2181-hez tartozó programok)
programs\dsp\dtable	(letölthető DSP-program)
programs\dsp\eprom	(beégethető DSP-program)
programs\dsp\ezkit	(a DSP fejl. környezet szoftverei)
programs\dsp\source	(DSP-program forrása)
programs\matlab	(matlab állományok)
programs\matlab\anal	(analízis fájlok)
programs\matlab\synth	(szintézis fájlok)
programs\matlab\toolbox	(segédfájlok)
data	(adatok)
data\dsp	(ADSP 2181-hez tartozó adatok)
data\matlab	(matlab sípadatok)
data\midi	(Demonstrációs midi fájlok)
samples	(hangminták)
samples\csaszar	(császári orgona mintái)
samples\tata	(tatai orgona mintái)
samples\naszaly	(naszályi orgona mintái)
thesis	(diplomamunka)
thesis\pic	(képek)
others	(egyebek)
others\latex	(segédfájlok a L ^A T _E X magyar használatához)
others\ghost	(GhostView program a PostScript fájlokhoz)

F.4.2. Audio demonstrációk

1. sáv: Számítógépes adatok

2. sáv: J. S. Bach: *Ich ruf zu Dir* korál, Wittenberg, 1535.

- Előállítás módja: MatLab szimuláció, zengetéssel
- Regisztráció:
I.manuál (dallam): *Principál 8' + Principál 2'*
II.manuál (kíséret): *Bourdon 8'*
Pedál (basszus): *Bourdon 8' + Subbass 16'*

3. sáv: J. S. Bach: *Ich ruf zu Dir* korál, Wittenberg, 1535.

- Előállítás módja: MatLab szimuláció, zengetés nélkül

4. sáv: Tatai, császári, modell és naszályi *Principál* sípok

- Előállítás módja: Eredeti sípfelvételek és MatLab szimuláció, zengetés nélkül

5. sáv: Tatai, császári, modell és naszályi *Fafedett* sípok

- Előállítás módja: Eredeti sípfelvételek és MatLab szimuláció, zengetés nélkül

6. sáv: *Principál* síp, modellje, a modell felharmonikusai, a modell zaja

- Előállítás módja: Eredeti sípfelvétel és MatLab szimuláció, zengetés nélkül

7. sáv: *Bourdon* síp, modellje, a modell felharmonikusai, a modell zaja

- Előállítás módja: Eredeti sípfelvétel és MatLab szimuláció, zengetés nélkül

8. sáv: J. S. Bach: *Ach, was soll ich, Sünder machen* korál, Breslau, 1657.

- Előállítás módja: Felvétel a naszályi templomban
- Regisztráció:
Bourdon 8'

9. sáv: J. S. Bach: *Ach, was soll ich, Sünder machen* korál, Breslau, 1657.
- Előállítás módja: MatLab szimuláció, zengetéssel
10. sáv: J. S. Bach: *Ach, was soll ich, Sünder machen* korál, Breslau, 1657.
- Előállítás módja: MatLab szimuláció, zengetés nélkül
11. sáv: *Principál* modell skála
- Előállítás módja: MatLab szimuláció, zengetés nélkül
12. sáv: *Bourdon* modell skála
- Előállítás módja: MatLab szimuláció, zengetés nélkül
13. sáv: J. S. Bach: *F-dúr kétszólamú invenció*, BWV 780
- Előállítás módja: ADSP 2181 DSP, zengetéssel
 - Regisztráció:
Bourdon 8'
14. sáv: J. S. Bach: *F-dúr kétszólamú invenció*, BWV 780
- Előállítás módja: ADSP 2181 DSP, zengetés nélkül
 - Regisztráció:
Bourdon 8'
15. sáv: J. S. Bach: *Ich ruf zu Dir* korál, Wittenberg, 1535.
- Előállítás módja: ADSP 2181 DSP, zengetés nélkül, csak dallam és kíséret (pedál nélkül)
16. sáv: J. S. Bach: *Ich ruf zu Dir* korál, Wittenberg, 1535.
- Előállítás módja: ADSP 2181 DSP, zengetés nélkül, csak kíséret és pedál (dallam nélkül)

F.5. Az ADSP-2181 EZ-KIT LITE kártya

Fejlesztői hardver (Ez-Kit Lite kártya):

- ADSP-2181 DSP-processzor

Főbb tulajdonságai:

- Aritmetikai, szorzó, shifter és címszámító egység
- 16 kszó adat és 16 kszó program/adat memória
- 2 soros port
- DMA port
- 33 MIPS

- AD1847 sztereó AD-DA átalakító

Főbb tulajdonságai:

- 80 dB jel-zaj viszony
- 16 bites felbontás
- 5.5-48 kHz között állítható mintavételi frekvenciák
- $\Sigma\Delta$ analóg-digitál és digitál-analóg átalakítók

- EPROM

- Ki/bemenetek

Főbb ki- és bemenetek:

- Tápcsatlakozás
- A processzor lábainak megfelelő jelek
- Sztereó audió be
- Sztereó audió ki
- RS-232 soros port
- Emulátor kimenet

Fejlesztői szoftverek:

- Assembler
- Linker
- ADSP-2181 Simulator
- Prom Splitter

F.6. A témához kapcsolódó érdekesebb honlapok

F.1. táblázat. Digitális (PCM) orgonákkal foglalkozó cégek honlapjai

Ahlborn orgelbau	http://www.generalmusic.com/ahlborn/...
Allen organs	http://www.allenorgan.com/...
Baldwin organs	http://www.bright.net/cos/page4.html
Johannus orgelbouw	http://www.johannus.com/...
Makin organs	http://www.makinorgans.co.uk/...
Prestige organs	http://www.churchorgansystems.com/...
Rodgers organs	http://www.rodgerscorp.com/...
Viscount organs	http://viscount.co.nz/...

F.2. táblázat. Szintéziskutatással foglalkozó egyetemek

CCRMA	http://www-ccrma.stanford.edu/...
IRCAM	http://www.ircam.fr/...

Rövidítések

ADC	Analog to Digital Converter
AM	Amplitude Modulation
BME	Budapesti Műszaki Egyetem
CAS	Circuits And Systems
CCRMA	Center for Computer Research in Music and Acoustics
CD	Compact Disk
DAC	Digital to Analog Converter
DFT	Discrete Fourier Transformation
DMA	Direct Memory Access
FFT	Fast Fourier Transformation
FIR	Finite Impulse Response (Filter)
FM	Frequency Modulation
IC	Integrated Circuit
ICASSP	International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing
IIR	Infinite Impulse Response (Filter)
IRCAM	Institut de Recherche et Coordination Acoustique / Musique
JAES	Journal of the Audio Engineering Society of America
MIDI	Musical Instruments Digital Interface
MIPS	Million Instructions Per Second
MMSz	Műszer- és Mérésügyi Szakosztály
MPEG	Moving Pictures Expert Group
MTA	Magyar Tudományos Akadémia
PCM	Pulse Code Modulation
PM	Physical Modeling
SNR	Signal to Noise Ratio
THD	Total Harmonic Distortion

S D G