

Orgonasípok hangjának digitális szintézise jelmodell segítségével

TDK dolgozat

Márkus János

V. éves villamosmérnök hallgató

konzulens:

dr. Sujbert László

Budapesti Műszaki Egyetem

Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

1998

Tartalomjegyzék

Előszó	3
1. Az orgonasípok és hangjuk jellemzése	5
1.1. Az orgona felépítése	5
1.2. Az orgona sípjai	5
1.2.1. Mérési körülmények	7
1.2.2. Állandósult spektrum	8
1.2.3. Tranziens jelenségek	10
1.2.4. Véletlen ingadozások	13
1.2.5. Külső hatások	14
2. Az orgonahang szintetizálására irányuló eddigi kísérletek	16
2.1. Az első modell: A Hammond-orgona	16
2.2. Analóg áramkörös orgonák	18
2.3. Digitális eljárások	20
2.3.1. Szintézis digitális mintavételezéssel és visszajátszással	20
2.3.2. A fizikai modellezés vizsgálata	22
3. Az alkalmazott modell ismertetése	25
3.1. Periodikus jelek modellje	25
3.2. A jelmodell alkalmazása hangszermodellezésre	26
3.1.1. Harmonikusok előállítása – az állandósult spektrum	27
3.1.2. Burkolók – tranziensek	28
3.1.3. Modulációk, zaj – kvázistacioner állapot, véletlen jelenségek	29
3.1.4. Külső körülmények	30
3.2. A modell megvalósítási lehetőségei, eddigi eredmények	30
4. Összegzés, kitekintés	33
Irodalomjegyzék	35
Melléklet	37
M.1. Állandósult spektrum	38
M.2. Tranziens jelenségek	41
M.3. Véletleningadozások	47

Előszó

A villamosmérnöki tevékenységek közül az egyik legrégebbi a hangjelenségek vizsgálata. Ezen a területen belül különösen érdekes a zenei akusztika, például a hangszerek tulajdonságainak elemzése. A jelenlegi mérés technikai műszerek és eljárások egyre precízebb ilyen tárgyú vizsgálatokat tesznek lehetővé, így sok érdekes jelenségnek ismerhetjük meg a pontosabb fizikai hátterét.

Az ilyen kutatások természetesen nem öncélúak, hiszen a kapott eredmények gyakorlatilag is felhasználhatók. Az egyik cél a híres hangszerépítők titkainak objektív vizsgálata, és ily módon jó minőségű hangszerek gyártása. Egy másik — zenész körökben — felmerülő igény pedig a nem szállítható, drága, illetve ritka hangszerek kiváltása valamilyen gazdaságosabban előállítható, de hasonló minőségű hangszerrel.

Ez utóbbi igény jelentkezik az orgonánál is, ugyanis egy művészi szempontból jó minőségű orgona előállítási költsége igen magas, valamint egy kész orgona nem is szállítható könnyen. Szükségesnek látszik tehát egy gazdaságos, hordozható, ugyanakkor megbízható és élethű hangú hangszer létrehozása.

A dolgozat első fejezetében az orgona és sípjainak rövid jellemzése után a modellezés érdekében végzett méréseimről számolok be. A fejezet további részében — részben irodalomkutatás, részben saját mérések alapján — részletesen foglalkozom a sípok által generált hang műszaki paramétereivel, kiemelve azokat, amelyek egy — pszicho-akusztikai szempontból — élethű hangzás előállításához szükségesek. A fejezetben a hangszerjellemzők közül a stacioner állapotbeli spektrum, a tranziens jelenségek, a sípra jellemző különböző sztochasztikus jellemzők és modulációk, valamint a hang végső kialakulását befolyásoló egyéb (sípon kívüli) hatások elemzéséhez szükséges jelfeldolgozási módszereket ismertetem, alkalmazva őket az általam felvett hangmintákra. A fejezetben belül vizsgálom, hogy mennyire érzékeny a hallásunk egyes jellemzőkre (harmonikus struktúra arányai, modulációk, tranziensek), mennyire súlyozottan kell az egyes jellemzőket megvalósítani. Mivel az így kapott jellemzők alapozzák meg egy adott hangszer hangjának jó minőségű mesterséges előállítását, ezekkel a jellemzőkkel objektíven lehet vizsgálni a kitűzött feladatra eddig alkalmazott megoldásokat, illetve a bevezetésre kerülő jelmodellt.

Dolgozatom második fejezetében az orgona modellezésének eddigi műszaki megoldásait foglalom össze. Kitérek az egyik legkorábbi próbálkozásra (Hammond-orgona), amely speciális (elektromechanikus) áramköri megoldásokkal modellezte az első fejezetben leírt jellemzők nagy részét, de jellegzetes hangja mégsem orgonasíp-szerű. A sípparaméterek ismeretében a modell hiányosságait is részletezem. A fejezet következő részében hasonló vizsgálatot végzek az analóg áramkörökkel megvalósított orgonamodellekre is. Ezek közül igényesebb modellek megtévesztően jó minőségű hangot is létre tudtak hozni, de egy bizonyos minőségi szint fölött az analóg áramkörök már túlságosan bonyolulttá váltak, és járulékos problémák jelentek meg (zaj, áthallás). A fejezetben belül végezetül a jelenleg elterjedt — és orgonasíp hangjának modellezésére különösen alkalmas — digitális hangszintézisek elméletét foglalom össze. Az egyik ilyen eljárás a *PCM*-szintézis, amely mintavett jelek dinamikus szűrésével reprodukálja a hangot. A másik, napjainkban még csak főként kísérleti stádiumban létező szintézis a fizikai modellezés. Mindkét eljárás működési elvét, hatékonyságát, hangminőségét és gazdaságosságát is vizsgálom.

A dolgozat harmadik fejezetében ismertetem a címben leírt jelmodell alapelvét, illetve alkalmazásának jogosságát. A modell lényege, hogy egy általános célú periodikus jelet előállító generátor kimenetét az első fejezetben tárgyalt jellegzetes paraméterekkel vezérelve,

egy olyan hangot állíthatunk elő, amely elméletileg jó minőséggel reprodukálja az orgona, vagy más egyéb hangszer hangját. A modell előnye, hogy általános struktúrájával a legtöbb (zenei hangot generáló) hangszer közelíthető, az egyes hangszerek közti különbségeket pedig csak az eltérő vezérlési paraméterekkel tartalmazhatják, így ugyanazzal a hardverrel többféle hangszer is megvalósítható. A fejezetben belül az egyes alfejezetek tartalmazzák a jelalak-modell megvalósításához szükséges részfeladatokat, algoritmusokat. Külön tárgyalom — az első fejezettel összhangban — az állandósult spektrum kialakításának lehetőségét és fontosságát, a tranziens jelenségek rekonstruálásához szükséges jelfeldolgozási elemeket, és a különböző modulációs jelenségek megvalósítására javasolt ötleteket. Megemlítem a külső körülmények befolyásoló szerepét is, amelyek a jelmodell koncepciójába csak nehezen képezhetők le, a modellezés hierarchikus rendszerbe foglalásával azonban, a hierarchia magasabb szintjén figyelembe vehetők.

Ugyanebben a fejezetben kerül sor a jelmodell ellenőrzési lehetőségeinek ismertetésére. A modell minősíthető ilyen célú elemző programokkal is (pl. MatLab), de a hatékonyság valós idejű ellenőrzésére lényegesen jobb módszer, ha a szintézis-algoritmust digitális jelfeldolgozó processzoron implementáljuk. A fejezet egy ilyen, Motorola DSP-re készült program jelenlegi állapotának leírásával, az érdekesebb algoritmusok megemlítésével zárul.

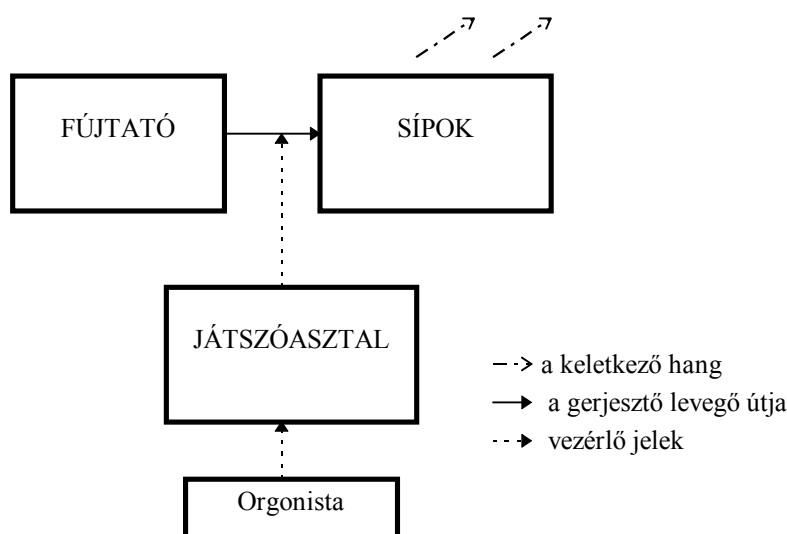
Az utolsó fejezetben összefoglalom a bevezetett modellezési eljárás előnyeit és hátrányait az eddig alkalmazott eljárásokkal szemben, valamint elemzem a modellben rejlő további lehetőségeket. A fejlesztés rövidtávú konkrét céljait is kitűzöm. Említést teszek a modell számításgényéről is, amely az eddig megvalósult szintézis eredményének ismeretében már becsülhető. Más hangszerek hasonló struktúrájú modellezésének lehetőségével és nehézségeivel zárom a dolgozatot.

1. Az orgonasípok és hangjuk jellemzése

Az orgonát nem méltatlanul nevezik a hangszerek királynőjének. Hangzásának sokszínűsége, variációs lehetőségei, dinamikája mind-mind felülmúlják a többi (akusztikus) hangszer lehetőségeit. A régi orgonák azonban nemcsak művészeti szempontból, hanem műszakilag is csodálatos alkotások.

1.1. Az orgona felépítése

A fogalmak egyértelmű használata érdekében röviden összefoglalom a klasszikus (sípos) orgona szerkezetét (1. ábra).



1. ábra Az orgona vázlatos felépítése

Az orgona hangkeltési mechanizmusa hasonlít a furulya (ajaksípok) illetve a klarinét (nyelvsípok) működési alapelveéhez, sípok segítségével történik. A különféle sípok felépítését és jellemzőit részletesebben a következő fejezetben ismertetem.

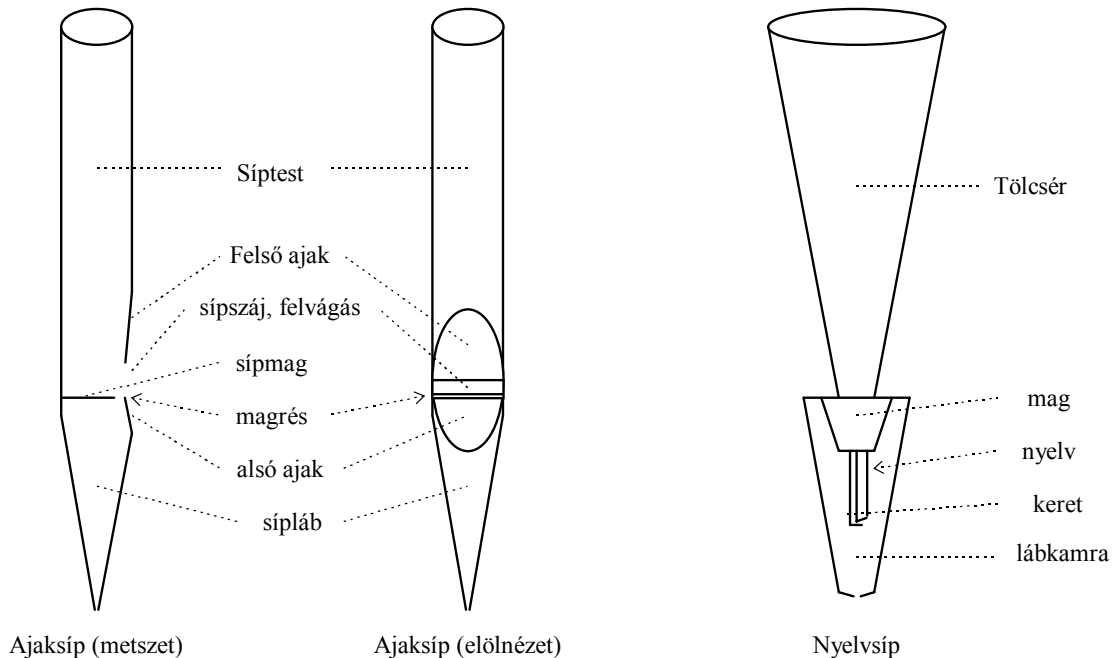
A sípok megszólaltatásához szükséges levegőt a fújtató tárolja és a hozzá tartozó levegőrendszer (szélcsatorna, szelládák) szállítja. Az orgonista a játszóasztalon található kezelőszervekkel (billentyűzet, pedálsor, regiszterkapcsolók) vezérli az ún. traktúra közvetítésével a levegő útját, így határozza meg, hogy egy adott pillanatban melyik síp szólhat. Az orgona felépítésének mélyebb szintű tanulmányozására bőséges irodalom áll rendelkezésre [Klotz, 1972][Tarnóczy, 1982][Ellenhorst, 1975][Pécsi, 1965], így a továbbiakban ezzel nem foglalkozom.

1.2. Az orgona sípjai

Az orgonában a sípok többféleképpen csoportosíthatóak. Az egyik ilyen csoportosítás a regiszterek szerinti. Egy regiszterben minden billentyűhöz (hangmagasság szerint) tartozik általában egy, ritkán több síp, úgy, hogy minden egyes billentyűhöz tartozó síp(ok) hangját azonos jellegűnek ítéljük. A megfogalmazás azért ilyen körülményes, mert a frekvenciaskála mentén a sípok paraméterei (méret, anyag(!), arányok) is és tulajdonságai is változnak. A regiszterek általában külön nevet kapnak (pl. Flute, Fedett), és számuk határozza meg az orgona méretét (kis orgonákban 3-12, közepesekben 20-40, a legnagyobbakban akár 80-130 is

lehet).

A regiszterek sípjai mindig besorolhatók az orgonaépítészet története során kialakult kétféle sípkategoriába, az ajak- és nyelvsípek csoportjába (2. ábra). Kisebb orgonákban csak ajaksípregiszterek találhatók, nagyobb orgonákban is csak a sípok legfeljebb 15%-a nyelvsíp.



2. ábra Az orgonasípek részei

A kétféle síptípus hangkeltési mechanizmusa eltérő. Az ajaksípekben a fújtatóból érkező levegő a magrésen át kiáramlik, majd a felső ajaknak ütközve ékhangot (peremhangot) hoz létre. A nyelvsípekben az áramló levegő egy fémlapozt rezget meg (a nyelvet). Az ékhangot és a nyelvet nevezhetjük a síp hanggenerátorának. A megfelelő hangerőt, a gerjesztés stabilitásának növelését akusztikai rezonátorral lehet beállítani (síptest, tölcsér). Különböző hangszíneket pedig a sípok méreteinek, anyagának, illetve a rezonátor típusának (cilindrikus, kónikus, nyitott, zárt) változtatásával hoznak létre (ezeket az adatokat ún. menzúra-táblázatok tartalmazzák). A hangszugárzás a sípszájánál, illetve a sípok tetején jön létre [Fletcher, 1991] [Angster, 1990].

Itt kell még megemlíteni azt a jelenséget, amelyet vég-korrekciónak hívnak, mivel később, a frekvenciatartománybeli analízis és a modellek jellemzése során még szükség lesz rá. A (most hengeres) rezonátor első közelítésben olyan akusztikai tápvonallal írható le, amelynek mindkét vége sugárzási impedanciával lezárt (nyitott ajaksípnál), illetve egyik vége sugárzási impedanciát lát, másik vége teljesen zártnak vehető (fedett ajaksípnál és nyelvsípnál) [Horváthné, 1997]. Eszerint a fizikai leírás szerint — a megfelelő peremfeltételek figyelembevételével — a sípban állóhullámok alakulnak ki, amelyek hullámhossza a következő képlettel számítható

mindkét végén nyitott sípnál:

$$l = (2k) \frac{\lambda}{4} \quad , \quad (1)$$

egyik végén zárt sípnál:

$$l = (2k - 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (2)$$

ahol l a síp hossza, λ a hullámhossz, k pedig pozitív egész szám.

Ezen egyenletek szerint tehát, ha egy nyitott sípot lezárunk, a keletkező hang legkisebb módusának (alapfrekvenciájának, $k=1$) hullámhossza pontosan kétszer akkora lesz, vagyis frekvenciája feleződik, a síp egy oktávval mélyebben szól. A valóságban ez nem teljesül, ennek oka az, hogy a levezetés nem veszi figyelembe, hogy a síphosszhoz képest az átmérő nem elhanyagolható. A véges átmérő miatt a határfeltételek (a lezárások) nem a síp végeinél vannak, hanem kitolódnak, és nem is lesznek teljesen „élesek”. Tehát pl. nyitott sípnál a létrejövő frekvenciákat nem a fizikai csőhosszal, hanem az ilyen, vég-korrektíválal megnövelt értékkel kell számolni:

$$l^{\parallel} = l + \Delta l_1 + \Delta l_2, \quad (3)$$

ahol $\Delta l_i = \Delta l_i(d, f)$, l' a virtuális, l a fizikai csőhossz, Δl_1 és Δl_2 a síp két végén lévő végkorrekciós tényező, amely függvénye az átmérőnek (d) és kismértékben a frekvenciának (f) is, így elég nehéz a pontos matematikai tárgyalása [Angster, 1990].

Gyakorlatilag minden orgonán található két ajakregiszter, a Principál (más néven Diapason, Prinzipal, Montre, Flautado), illetve a Bourdon (Bordone, Bordun). Ebben a dolgozatban a sípok hangjának általános jellemzőit ezeknek a sípoknak a paramétereivel fogom szemléltetni. Másfajta sípok hasonló jellemzőiről több irodalomban is lehet mérési adatokat találni [Angster, 1990, 1995] [Albert, 1980-87].

A Principál regiszter az orgona legfontosabb regisztere, ez az a sípsor, amelynek nagyobb sípjait gyakran helyezik az orgona homlokzatára (az ún. prospektbe). Nyitott, henger alakú, arányos fémsípok (mélyfekvésben fásípok is lehetnek) a tagjai. Hangja érces, kissé fanyar, jellegzetes orgonahang.

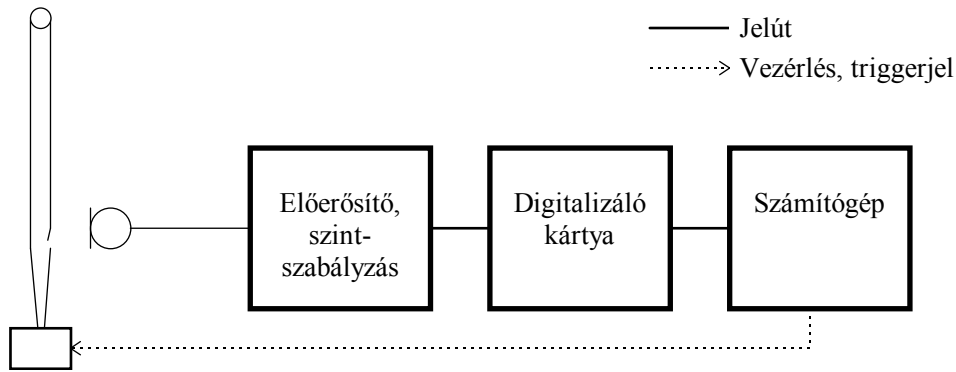
A másik jellemző regisztert, a Bourdont, legtöbbször (mélyfekvésben mindenképp) fából készült fedett sípok alkotják. Hangja lágy, telt, hasonlít a barokk furulya (Blockflöte) hangjára, igen jellegzetes a megszólalása, ugyanis füllel hallhatóan a síp egy magasabb módusban (duodecima) rezeg először, majd utána szólal meg az alaphang (a síp „köpköd”) [Klotz, 1972]. Ezt a mérési eredmények is alátámasztják (2.2. fejezet).

A hangszer objektív vizsgálata érdekében — az irodalomkutatás mellett — méréseket végeztem a tatai és a naszályi református templom orgonáján. A tatai templom orgonája közel 170 éves, klasszicista stílusú, mechanikus traktúrájú hangszer, a naszályi templomé pedig a századforduló után épült, pneumatikus vezérlésű Angster-orgona. Mindkettőn megtalálható az imént jellemzett két regiszter, így a mérések a két orgona építése között eltelt 80 év alatti hangzásbeli változást is kimutathatják, ha volt ilyen.

A következő fejezetben az általam végzett mérés körülményeit dokumentálom.

1.2.1. Mérési körülmények

A sípok hangjának felvételéhez használt mérési elrendezés látható a 3. ábrán.



3. ábra Mérési elrendezés

Az egyes részek paraméterei:

- mikrofon: Akai ACM-50 típusú elektret kondenzátor mikrofon, elemről működő beépített mikrofon-előerősítővel
- szintszabályzás: Technics RS BX-404 típusú sztereó kazettás deck előerősítő fokozata
- digitalizáló kártya: Gravis Ultrasound P&P hangkártya
- számítógép: IBM-kompatibilis PC

Az így összeállított rendszer elektromos zaja a hangdigitalizáló kártya maximális kivezélhetőségéhez képest -70 dB-nél kisebb volt. (A továbbiakban is a maximális kivezélhetőséget fogom referenciaszintnek tekinteni.)

A mérés során a mikrofont $10-12$ cm-re helyeztem el a mérendő síp szájánál, ill. néhány esetben a síp felső nyílásánál. A teremreflexiók miatt kívánatos lett volna még szelektívebben mérni, de ezt két okból sem tudtam megtenni. Egyrészt a mikrofonba beépített előerősítő fokozat határolt, másrészt a túl közel helyezett mikrofon hallható módon befolyásolta a síp hangját (az előző fejezetben részletesen leírt végkorrekció miatt).

A jelszint-módosító erősítő után a hangot $F_s = 44.1$ kHz mintavételi frekvenciával, 16 bites pontossággal mintavételeztem. Egy ilyen mérés eredmény látható a mellékletben található ábragyűjtemény első ábráján (M.1).

A mérést két körülmény is nehezítette. Egyrészt az, hogy nem süketszobai felvételek voltak, ezért a síp lecsengésének jellemzőibe erőteljesen beleszól a nagy zengő terem is. Másrészt, elég nagy volt a környezeti alapzaj, amely külső zajokból, a fűtatómotor zajából és a tömítési hibákból származó levegőáramlások sziszegéséből tevődött össze. A mérésorozat elején végeztem környezeti zajszint mérést is, amely mindegyik mérési pozícióban -40 dB alatt maradt, a felharmonikusok minimális észlelési határa tehát elég magas.

A következő fejezetekben ezen mérések és irodalmi hivatkozások alapján összefoglalom az orgonasípok hangjának jellemzőit, amelyek fontosak a hangszerek pszicho-akusztikai jellemzésének szempontjából, és ily módon megalapozzák az orgonamodellek objektív minősítését is, valamint kiindulási alapot jelenthetnek egy — a címben leírt — jelmodell létrehozásához.

1.2.2. Állandósult spektrum

A hangszereknek — így a sípoknak is — egyik közismert jellemzője a stacioner

állapotban kialakuló hangszínkép, a spektrum. Az orgona regiszterei e tekintetben (is) erősen különböznek egymástól. A fedett sípok a páros felharmonikusokat igen kis amplitúdóval tartalmazzák (a peremfeltételek nem teszik lehetővé kialakulásukat), a nyitott ajaksípok 8-15 felharmonikusot tartalmaznak, a nyelvsípok lényegesen többet. Bizonyos sípoknál formánsok is felfedezhetőek (főleg a nyelvsípoknál). Általánosan elmondható, hogy minél bővebb egy síp, annál kevesebb felharmonikus alakul ki benne, ugyanis egy d átmérőjű csőben csak $\lambda/4 > d$ hullámhosszú összetevők alakulhatnak ki [Tarnóczy, 1982].

A hangszínek azonban nemcsak a regiszterek között eltérőek, hanem egy-egy regiszteren belül is változnak. Jellegzetes, hogy (egy regiszteren belül) a magasabb alaphfrekvenciájú sípok felharmonikus-tartalma lényegesen kisebb, mint a mélyebb fekvésbeli sípoké. (Különösen érdekes az, hogy ennek ellenére mégis egyforma hangúaknak tűnnek.)

A melléklet M.1.1. - M.1.6. ábrái ezeket a jellegzetességeket mutatják (számértékek nélkül, itt csak az egyes harmonikusok arányát szeretném érzékeltetni). A képeket MatLab program segítségével készítettem, nagy pontszámú FFT-t alkalmazva. Azért, hogy az egyes felharmonikusok jól elkülönüljenek egymástól, az akusztikában szokatlan lineáris frekvenciaskálát választottam.

A melléklet első spektrumábráján (M.1.1.) két, azonos névleges frekvenciájú síp stacionárius jellemzői láthatóak. Megfigyelhető, hogy a fából készült síp (Bourdon) lényegesen kevesebb komponenset tartalmaz, mint a nyitott fém síp, valamint az, hogy a fedett síp a páros harmonikusokat kisebb amplitúdóval tartalmazza, mint a páratlanokat. Hangra is sokkal lágyabb, kerekesebb hangja van a Bourdon regiszter sípjainak.

Még egy érdekes jelenség látható az ábrán. Az egyes harmonikus komponensek mellett megfigyelhetőek keskenysávú, nemharmonikus komponensek. Egy ilyen részlet látható kinagyítva a 2. ábrán (M.1.2.). Ezek a komponensek valószínűleg a gerjesztő (zajszerű) ékhang jellegzetes „formánsai” [Angster, 1990]. Mivel ezek a jellemzők sztochasztikusak, ezért részletesebben az 1.2.4. fejezetben foglalkozom velük.

A melléklet következő ábráján (M.1.3.) a tatai és a naszályi orgona Principál regiszterének egy-egy (azonos névleges frekvenciájú) sípját hasonlítom össze. Megfigyelhető, hogy mindkét síp tartalmazza az összes felharmonikusot, de az arányok eltérőek, annak ellenére, hogy mindkettő regiszter ugyanazt a nevet viseli. Meghallgatva a két felvételt, füllel is feltűnik a különbség, de mind a két hang jellegzetesen "principálos". Ebből azt a tanulságot vonhatjuk le — bármilyen típusú modell létrehozásakor —, hogy a sípjelleget döntően nem az egyes harmonikusok pontos aránya fogja meghatározni, nem ez lesz a legkritikusabb paraméter.

A négyes számú ábrán (M.1.4.) egy nyitott ajaksíp (Principál) ajaknyílásán és tetején kisugárzott jelek spektrumát hasonlítom össze. Az ábrán látszik, hogy egyes komponensek között akár 10 dB eltérés is előfordul, de az időfüggvényt megnézve, az eredő jelteljesítmény közel azonos (itt ez utóbbit nem ábrázolom). A két felvétel között az eltérések hallhatók, ez is figyelembe veendő egy modell megalkotásánál. Más is végzett ilyen jellegű méréseket, és ott erre a jelenségre modellt is állítottak fel, amely szerint a fázisviszonyokra az jellemző, hogy a páros felharmonikusokat azonos, a páratlanokat pedig ellentétes fázisban sugározza a síp két vége [Angster, 1990]. (A fázisviszonyok problémájára a modellalkotásnál még kitérek (3. fejezet)).

A melléklet ötödik és hatodik ábrája (M.1.5-6.) mutatja be azt, hogy a regisztereken belül hogyan módosul a hangszín, a felharmonikus-tartalom. Az ábrázolásnál ugyanazt a dB-skálát alkalmaztam, azonban azért, hogy a sípok jobban összehasonlíthatók legyenek, a frekvenciaskála mindig duplázódik. Így az egymástól oktávnyi távolságra lévő sípok

felharmonikus-struktúrája pontosan ugyanolyan léptékű. Több érdekes jelenség is megfigyelhető az ábrán. Az egyik az a — már említett — jelenség, hogy a magasabb alaphérvencijájú hangok kevesebb összetevőt tartalmaznak. Dinamikus jelmodellben ez a jelenség mindenképpen csökkentheti a számítási igényt. Megfigyelhető az is, hogy a változás mértéke regiszterenként eltérő, Principál sípoknál az amplitúdó-csökkenés lényegesen kisebb mértékű, mint a Bourdon regiszternél. Egy harmadik észrevétel, hogy Bourdon regiszternél a felharmonikus-struktúra is megváltozik. Az elméleti számítások szerint fedett sípnál páros sorszámú harmonikus nem jöhet létre. Mélyhérvencinán ez nagyjából teljesül is, a megfelelő komponensek aránya tényleg kicsi, azonban a kisebb sípoknál egyre erősödik ezen komponensek amplitúdója, főként a II. harmonikusé (szinte csak az első két harmonikus amplitúdója számottevő). A jelenség legvalószínűbb magyarázata az lehet, hogy magasabb hérvencinán már nem tekinthető a kecskebőr és fa együtteséből készített lezárás végtelen akusztikai impedanciának. Ennek a jelenségnek sem mérését, sem magyarázatát nem találtam az irodalomban.

A nyelv sípokról (amelyeket itt most — felvételek hiányában — nem elemzek) röviden elmondható, hogy a fémlemez-gerjesztés miatt lényegesen nagyobb a felharmonikus-tartalmuk, és rezonátoraik kialakításának következtében jellegzetesebb formánsstruktúrájuk van, mint az ajaksípoknak [Albert, 1980].

Összefoglalva, a sípokra jellemző felharmonikus összetevők száma és aránya regiszterenként más és más, ráadásul regiszteren belül is változik, ugyanakkor két azonos nevű regiszternél is lehetnek eltérések. Ez azt jelenti, hogy az egyes regiszterszínképek kialakítása fontos, de döntően nem ez fogja egy sípsor karakterét megadni. Ajaksípok esetében nemharmonikus komponensek is megfigyelhetőek a spektrumban, ezek figyelembevételének mértékét, megvalósításának pontosságát csak meghallgatással lehet eldönteni.

1.2.3. Tranziens jelenségek

Számos irodalom hangsúlyozza, hogy a hangszerek berezgési folyamatai döntőek a felismerhetőség szempontjából. Több olyan kísérletről is olvashatunk, amelyek ezt vizsgálták. Volt olyan, amely során egy zeneileg képzett hallgatóságnak berezgési folyamat nélküli orgonasípokról kellett eldönteni, hogy milyen regisztercsoportba tartoznak. A kísérlet kimutatta, hogy a közönség, amely tranzienssel együtt teljesen biztosan meg tudta állapítani az egyes sípok származását, anélkül bizonytalan lett, összekeverte az egyes sípcsoportokat [Angster, 1990]. Egy másik kísérlet pedig különféle hangszerek játékmódját, megszólalását alkalmazta egyszerű szinuszcsoportra, és a laikus közönség meg tudta mondani, hogy milyen hangszert hallott [Jánosy, 1992]. A tranziens folyamatok vizsgálata azért is fontos, mert sokszor (gyors játéknál) a hangszerek nem is jutnak stacioner állapotba, nincs értelme hosszúidejű energiaszínképről beszélni.

Ugyanakkor a tranziens jelenségek vizsgálata lényegesen bonyolultabb, mint az állandósult spektrumé. Egyik nagy probléma, hogy az idő- és a hérvenciacsoportolás egyidejűleg nem lehet tetszőlegesen pontos. Ha T_w -vel jelöljük az időtartománybeli ablak méretét, df -fel a hérvenciacsoportolást, akkor egy N -pontos DFT alkalmazva a két csoportolás szorzata:

$$T_w \Delta f = (N \Delta t) \left(\frac{f_s}{N} \right) = \left(\frac{N}{f_s} \right) \left(\frac{f_s}{N} \right) = 1, \quad (4)$$

ahol f_s a mintavételi hérvencia.

A különféle mérések szerint a fül 1 kHz alatt közel egy nagyságrenddel jobb csoportolást tud elérni, amely csoportolást lineáris mérőműszerekkel nem tudunk megvalósítani [Albert, 1980].

A felbontás javítására az egyik lehetőségünk átlapolódó futóablakos FFT-programmal spektrogramm készítése. Szintézis-kísérletnél viszont nehéz értelmezni az így kapott átlapolódott spektrumokat, ráadásul ezeket az ábrákat nehéz lenne e dolgozat keretén belül rekonstruálni, ezért nem ezt az eljárást alkalmaztam.

Egy másik lehetséges módszer lehet a különféle idő-frekvenciatartománybeli módszerek alkalmazásával vizsgálni a jel változását. Ilyen például a Wigner-disztribúció, illetve a Cumulative Attack és Decay Spectrum eljárás [Koller, 1991]. Ezek alkalmazása azonban meglehetősen bonyolult algoritmusok implementálását igényli, valamint — mivel nemlineáris transzformációs függvények —, az egyes felharmonikusok között interferenciákat hoznak létre, és ezek kiszűrése további elméleti megfontolásokat igényel.

Egy viszonylag egyszerű eljárás az egyes felharmonikusok berezgési folyamatának vizsgálatára, ha az adott komponenszt kiszűrjük egy lineáris fázisú szelektív sávszűrővel, majd meghatározzuk az így kapott jel burkolóját.

A tranziensek detektálására, megfigyelésére MatLab programot írtam. Az eredményeket a mellékletben található ábragyűjtemény tartalmazza (M.2.1-8).

Az első ábra (M.2.1) egy Principál síp berezgési folyamatát ábrázolja, erősen kinagyítva. Ebből az ábrából sejtethető, hogy valamelyik nagyobb frekvenciás komponens szólal meg először, de pontosabban ebből az ábrából nem tudunk kikövetkeztetni, még erős nagyítással sem.

Ugyanazon síp felharmonikusait ábrázolom a következő ábrán (M.2.2). A tengelyeken nem szerepelnek az egységek, ezeket az áttekinthetőség kedvéért hagytam el. A mértékegységek megegyeznek az előző ábrán alkalmazottakkal, itt is a megszólalás első 400 milliszekundumát jelenítem meg, azonban a lineáris skálázású ábrarészleteknél — a láthatóság érdekében — az amplitúdó-skála változik. Ez az ábra már lényegesen informatívabb, mint az előző. A baloldali oszlop (felülről lefelé) tartalmazza az első öt harmonikus összetevő időtartománybeli jelalakját, lineáris amplitúdó-skálával, a jobboldali pedig az egyes harmonikusok Hilbert-transzformációval meghatározott burkolóját, logaritmikus amplitúdó-skálával. Jól látható, hogy a felfutási szakaszok (főleg a nagyobb amplitúdójú komponenseknél) logaritmikus ábrázolásban jól közelíthetők lineáris egyenessel, így ezek exponenciális felfutásúak. Ez a tény a modellt lényegesen egyszerűsíti, mert így IIR szűrőkkel ezek a szakaszok realizálhatók. További vizsgálatot igényelnek a magasabb komponenseknél megjelenő zajos berezgési folyamatok, hogy azok a síp adott módusának berezgési próbálkozásaiból származnak, vagy csak a berezgés során termelődő zaj sávszűrőn áteresztett komponensei. Jellegzetes ugyanis, hogy a síp először a felsőbb módusokban, zajosan szólal meg, és utána az energia az alsó komponensekbe tömörül. Az ábrán mindenesetre látszik, hogy ennél a sípnál először (kis amplitúdóval) a magasabb felhangok, majd (közel egyidejűleg) a második harmonikus alakul ki, és sokkal (körülbelül 100 milliszekundummal) később szólal meg a harmadik, majd az alapharmonikus. Az energia fokozatosan az alapharmonikusba áramlik át, amely végül (a megszólalás kezdetéhez képest körülbelül 180 milliszekundummal később) eléri a maximális amplitúdót. Ez a megszólalás — az orgonairodalom szerint is és meghallgatva is — túl hosszú, pergőbb játéknál nem tud kialakulni az alaphang. Ennek oka az, hogy ez a síp rosszul van beállítva (intonálva), de éppen ezért választottam példának, mert a jelenségek jól elkülöníthetők. Helyesen beállított sípknál is megvan ez a jelenség, de lényegesen gyorsabban játszódik le.

Élethű jelmodell alkotásához fontos tudni azt is, hogy az egyes felharmonikusok frekvenciája hogyan változik a megszólalás során. Az orgonasípok hangját hallgatva ugyanis, képzett zenészeknek az a véleménye, hogy a kezdeti magasabb módusokban rezgő síp nem a később kialakuló alaphang megfelelő felharmonikusain rezeg, hanem magasabb frekvencián.

Ezt a jelenséget az orgonahang irodalma is tárgyalja [Albert, 1980] [Fletcher, 1991]. Sajnálatos módon ezt a tranziens frekvencia-eltolódást sem lehet frekvenciatartományban detektálni, mert a tranziens időtartama olyan kicsi, hogy az alkalmazható pontszám nem biztosít elég finom frekvenciafelbontást a változások észleléséhez.

A szakirodalmi leírások, mérési eredmények és szintéziskísérletek azt mutatják, hogy a jelenség nem egyszerű. Különböző elemzések során az derült ki, hogy a tranziens időtartam alatt nem a harmonikus komponensek "vándorolnak" a frekvenciasíkon, hanem a berezgési folyamat során a zajjellegű gerjesztésből fokozatosan alakulnak ki a spektrumban olyan csomópontok, amelyekből aztán kirajzolódnak a spektrumvonalak. Ez a nemlineáris folyamat elég nehezen illeszthető be egy lineáris jelmodellbe, de közelíthető például egy lecsengő zaj- és egy fokozatosan növekvő harmonikus struktúrájú jel összegeként (a megoldásról a 3. fejezetben írok részletesebben). Ehhez azonban mindenképpen meg kell vizsgálnunk a jel zajtartalmát.

A zaj vizsgálatát úgy végeztem el, hogy a korábban szűrőkkel kinyert harmonikusokat kivontam az eredeti jelből. Az egyes harmonikusokat nagypontszámú FIR tűszűrőkkel szűrtem ki a spektrumból, de természetesen a szűrőkarakterisztikák valamilyen mértékben mindenképpen befolyásolják a zajspektrumot is. Az így kapott különbségi jel azonban közelíti a környezet zajának és a síp saját zajának összegét. Szűrőktől függetlenül, ha a zajtartalom tényleg számottevő, akkor biztos, hogy a környezeti zaj szintje alatta marad a síp zajának, különben a környezeti zaj elfedné azt, és füllel sem lenne detektálható. Az eredményt a mellékletben található ábrák mutatják. Egy síp eredeti jelét, és a jelentősebb spektrumvonalak elhagyásával kapott jelet tartalmazza a melléklet harmas számú ábrája (M.2.3). Ezen jelek állandósult állapotának spektrumát mutatja a következő ábra (M.2.4). Az ábrából látható, hogy a síp harmonikusain kívül több helyen is vannak energiacsomók, valamint az is látszik, hogy a szűrőkarakterisztikák tényleg befolyásolják a spektrumot. Az előző fejezetben már részben volt arról szó, hogy ezek a nemharmonikus spektrumcsomók a gerjesztő ékhang összetevőiként közelíthetők. A jelenség részletesebb magyarázatát a következő (1.2.4.) fejezetben adom meg, modellezésére különféle ötleteket a (3.1.3.) fejezetben adok. Ebben a fejezetben, a zajtranziens vizsgálatánál csak azt a következtetést tudjuk levonni, hogy a berezgési folyamat alatt a zaj is jellemezhető amplitúdó-burkolóval, viszonylag korán megszólal (ez a fizikai megvalósításból is következik), további vizsgálatokat igényel a zaj spektrumának berezgési folyamat alatti változása.

A tranziens jelenségek — akárcsak az állandósult állapotbeli felharmonikus-arányok — szintén jellegzetes változásokat mutatnak a frekvenciaskála mentén. Ezek a változások két csoportba oszthatók [Albert, 1980]. Az egyik csoportot alkotják az egyes regisztereken belül tudatosan kialakított, formált jellemzők, amelyek hatására érezzük azt, hogy egy magasabb frekvenciájú síp „ugyanúgy” szólal meg, mint egy mélyebb, de ugyanabba a regiszterbe tartozó síp. A másik nagy csoportba pedig azok a jellemzők sorolhatók, amelyeket a gyártási szórás (amely elég nagy, mivel ezeket a sípokat még ma is manufaktúrákban állítják elő), a — kizárólag — füllel történő intonáció (beállítás), illetve a sípok elhelyezése határoz meg. Ez utóbbi paraméter-szóródás alakítja ki az egyes sípok „egyénségét”, saját, egyedi hangját.

Ahhoz, hogy a regiszter karakterének jellegzetességeit, és a technológiai pontatlanságokból adódó egyedi eltéréseket külön lehessen választani, nagyszámú mérést kellene végezni, és átlagolni (egy regiszter mindegyik sípjáról több felvételt is kellene készíteni). Egy ilyen mérésorozatot sok idővel jár. Készítettem is egy sípról tíz felvételt, de két okból sem dolgoztam fel. Az egyik ok az, hogy a modellalkotás jelenlegi állapotában még nincs rá szükség, a másik pedig az, hogy az általam elvégzett mérések nem hitelesek, nem áll rendelkezésemre adat sem a mikrofon érzékenységéről, sem a mikrofon és az erősítő

fokozatok torzításáról, valamint helyszűke miatt a mikrofont sem tudtam mindig azonos távolságra tenni az egyes sípoktól. Így megkérdőjelezhető lenne a kapott eredmények megbízhatósága.

Ebben a dolgozatban így csak a két mért regiszterből kiragadott néhány síp tranzienst elemzését mutatom be. Ennek ellenére ezekből is hasznos információkat kaphatunk. A melléklet megfelelő ábrái (M.2.5-8) négy Principál- és négy Bourdon-sípról készült analízis eredményeit mutatják. Az ötös és hatos számú ábrán a Principál-sípok első öt felharmonikusának berezgése látható, lineáris illetve logaritmikus ábrázolásban. Sajnos a kép felbontása nem túl jó, de a fő jellegzetességek felismerhetőek. Az egyik ilyen fontos eredmény, hogy a Principál regiszteren belül végig megmarad az a jellegzetesség, hogy a II. harmonikus túllövést mutat, és mindig megelőzi az alapharmonikust. Ez utóbbi elmondható a többi harmonikusról is. Szintén jellegzetes, hogy a IV. harmonikus berezdeg, elhal, majd újraindul, valamint az ötödik harmonikus is jelentős kezdeti túllövést mutat. A III. harmonikus komponens viszont elég furcsán viselkedik, nem mutat egyértelmű változást, ennek részletesebb elemzéséhez több síp vizsgálatára, illetve síponként több felvételre lenne szükség.

A Bourdon-sípok ábráiról is leolvasható néhány érdekes jellemző (M.2.7-8). Az egyik az, hogy az egyes harmonikusok közel egyszerre szólalnak meg. A logaritmikus skáláról jól leolvasható az is, hogy az alapharmonikus berezgési időállandója a frekvencia növekedésével arányosan csökken. Az egyes sípok eltérése azonban itt lényegesen nagyobb, mint a Principál sípok esetében. Az előző fejezetben részletezett ok miatt a II. harmonikus a berezgés során is az alapharmonikus növekedésével egyre intenzívebben jelentkezik.

Összefoglalásként elmondható, hogy a tranzienst jelenségek egy hangszer felismerhetősége szempontjából meghatározók, ezért egy hangszermodell létrehozása során mindenképp figyelmet kell fordítani rájuk. A feladat azonban nem egyszerű, mert az egyes sípok jellemzői elég nagy szórást mutatnak, így egy részletes vizsgálat sok időt és mérést vesz igénybe. Néhány jellegzetesség azonban így is meghatározható, és az így kapott paraméterek kiindulási lépcsői lehetnek általános következtetések levonásának, és egy modell megalkotásának. Az, hogy ilyen mértékű közelítés megengedhető-e, vagy pedig tovább kell a tranzienst folyamatokat analizálni, majd csak a szintézis során fog kiderülni.

1.2.4. Véletlen ingadozások

Az akusztikus hangszerek hangja a berezgési folyamatok elmúlásával sem lesz teljesen periodikus (gondoljunk például a vonós hangszereknél alkalmazott vibrátóra). Az orgona esetében ugyan igaz, hogy a művész a billentyű lenyomása után nem tudja befolyásolni a hangot, de az így kialakuló hang jellemzői mégsem lesznek tökéletesen stabilak. Ennek fizikai magyarázata az, hogy az egyik legfontosabb tényező, amely befolyásolja a síp hangját, a gerjesztés. A beáramló levegő jellemzői azonban csak statisztikus jellemzőkkel írhatók le (pl. sebesség, turbulencia). Mivel a síp érzékenyen reagál ezekre a paraméterekre (ugyanis bonyolult kölcsönhatás van a gerjesztő levegő és a síp levegőoszlopának rezgése között [Fletcher, 1991]), kimenő jelében is létrehoz ilyen statisztikus ingadozásokat. Pontos információkat nem találtam arról, hogy a hallásra ezek a jellemzők hogyan hatnak, azonban sok kísérletet végeztek ezzel kapcsolatban is. A kapott eredmények szerint a kísérlet résztvevői kellemesebbnek, hallgathatóbbnak mondták azokat a hangokat, amelyek stacioner állapotában kismértékű ingadozások is voltak [Tarnóczy, 1982].

A síp mérhető jellemzői közül több is mutat ilyen, statisztikus jellegzetességet. Az egyik ilyen jellemző az időfüggvényből is jól látszik, nevezetesen az amplitúdó-ingadozás (M.3.1.).

Részletesebben vizsgálhatjuk a jelenséget, ha nem a komplett jelet, hanem — az előző fejezetben ismertetett módszer szerint — az egyes harmonikusok burkolójának ingadozását vizsgáljuk. Ilyen módszerrel készült a 2. számú ábra (M.3.2.). Ezen jól látható, hogy az alapharmonikus ingadozik legkevésbé, és a magasabb módusok amplitúdója egyre zajosabb. Különösen érdekes, ha egy adott felharmonikust többféle sáv szélességű szűrővel szűrünk ki az eredeti spektrumból. Egy 1/12, 1/3 és 1 oktáv sáv szélességű szűrővel kiszűrt N. felharmonikust mutat a melléklet 3. ábrája (M.3.3.). Jól látható, hogy nagyobb sáv szűrő alkalmazásával nagyobb modulációs mélységet látunk a felharmonikuson, ugyanakkor a jelszint is nagy mértékben megnő. Ebből az a következtetés vonható le, hogy a felharmonikus környékén vannak olyan spektrum-komponensek, amelyek hatnak az adott harmonikusra. Egy hatékony jelmodellbe egy ilyen nemlineáris jelenség beilleszthető úgy, hogy a spektrumot valóban az egyes felharmonikusokra ható amplitúdó-modulációval állítjuk elő (időtartománybeli modellezés) [Angster, 1990]. Ezek a komponensek véleményem szerint azonban jobban modellezhetők zajként, mint modulációként, mert a spektrumban látszik, hogy a „modulációs oldalsávok” nem mindig kötődnek szorosan a vonalas spektrumkomponensekhez (M.1.2. ábra).

A jellegzetes kiemeléseket tehát célszerűbb fehérzajból rezonáns szűrőkkel kialakítani, és az amplitúdó-ingadozásokat így modellezni (frekvenciatartománybeli modellezés). Problémát jelent a rezonáns szűrők sáv szélességének meghatározása, mert a zajos energiacsúcsok és az ablakozás együttes hatására a spektrum erősen szétkenődik (szintézishez a spektrumot átlagolni kell).

Ezzel az utóbbi (frekvenciatartománybeli) megoldással viszont feltételezzük, hogy a zaj és a zenei hang független lineáris kombinációjaként áll elő az eredő síphang. A közelítés jogosságát alátámasztja az a tény, hogy a zajkomponensek amplitúdója elég kicsi. Véglegesen azonban csak akkor fogadható el egy ilyen egyszerűsítés, ha az emberi hallás is "becsapható" vele.

Hasonló vizsgálatokat lehetne végezni a síp által generált hang ill. felharmonikusainak frekvencia-, fázisváltozásaival. Szintéziskísérletekben olyan megoldást próbáltak ki, amely során csak az alapharmonikus frekvenciáját változtatták, úgy, hogy azzal együtt a felharmonikusok frekvenciája is változott [Albert, 1980]. Más irodalmak szerint azonban az egyes felharmonikusok fázisviszonya, frekvenciája is változhat kismértékben [Fletcher, 1991]. Mivel ezt a jelenséget nehéz leírni lineáris jelmodellel, ezért a szintézis első szintjén ezzel nem foglalkozom.

A fejezet összefoglalásaként elmondható, hogy élethű hangzás kialakításához a tranziens jelenségeken és az amplitúdó-arányokon kívül a hangszerre jellemző véletlen modulációkat is figyelembe kell venni. Ezek az amplitúdó- és fázisváltozások, valamint a nemdeterminisztikus jelenségek (zaj) vizsgálatát, és megvalósítását jelentik. Ezeknél a paramétereknél is a modellezés szükséges pontosságát a szintézis fogja meghatározni.

1.2.5. Külső hatások

A síp előző fejezetekben részletesen elemzett eddigi jellemzői mind a síp fizikai megvalósításával indokolhatóak voltak. Szükséges azonban még megemlíteni azokat a hatásokat, amelyek az orgonasípot kívülről érik, és szintén befolyásolják a kialakuló hangképet.

Az egyik legmeghatározóbb ilyen jelenség a terem hatása. Manapság már nagyon ritkák a szobaorgonák, általában nagy termekben, templomokban hallgatjuk őket. Ezeknek a templomoknak elég nagy az utózengei ideje, ráadásul szinte mindig távolról hallgatjuk az

orgonát. Ezért a terem mindenképp meghatározza — ha nem is az orgona hangját, de — a mi ízlésünket. Magam is meglepődtem, és laikus ismerőseim is csodálkoztak, amikor az egyes sípok közvetlen közletről felvett hangját meghallgattuk, és teljesen szokatlannak, egyáltalán nem orgonaszerűnek találtuk. Egy jó modellben mindenképp benne kell lennie egy opcionális zengetőnek, amely a teremérzetet létrehozza, viszont nagy termékben hagyja érvényesülni a terem saját válaszát. Ennek a feladatnak az elemzése és megvalósítása azonban meghaladja a dolgozat kereteit, ezért nem foglalkozom vele.

Egy másik ilyen hatás az egyes sípok eltérő pozíciójából ered. Az orgonában ugyanis a valódi sípok viszonylag nagy térben helyezkednek el. Az egyes regiszterek vízszintesen frekvencia szerint vannak tagolva (C-, Cisz-oldal [Klotz, 1972]), ezenkívül a térben is különböző regisztercsoportokat (ún. műveket) alakítanak ki. Ennek az az eredménye, hogy minden síp máshonnan szól. Az orgonairodalomban eltérők a vélemények arról, hogy a jelenség modellezése szükséges-e vagy nem. A szintézis egy magasabb szintjén nyilvánvalóan foglalkoznunk kell vele, de valószínű, hogy csak másodlagos hatása van, éppen azért, mert a lehallgató terem méreteihez képest a sípok távolsága kicsi, és így ez utóbbinak hatását a teremben kialakuló reflexiók elfedik.

A síp hangját befolyásoló lényeges hatások közül már csak egy maradt, mégpedig a többi síp jelenléte és hangja. Az orgonában ugyanis szinte mindig több síp szól akkor is, ha csak egy hangot nyom le az orgonista a billentyűn (ilyenkor ugyanis általában egynél több regiszter működik, a hangzás gazdagságának fokozására). A különböző helyeken lévő, egyenként hangolt és beállított sípok eredő hangja — az egyes sípok paramétereinek eltérése miatt — kismagasságú lebegéseket, interferenciákat okoznak. Egy másik nagyon érdekes jelenség az ún. „Mitnahme” effektus, amely lényege, hogy két, kicsit eltérő frekvenciájú síp, ha közel áll egymáshoz, csatolásba kerül, és közös frekvenciára hangolódnak [Angster, 1993]. A modellezés első szakaszában azonban ezeknek a jelenségeknek a figyelembevétele csak bonyolítja a szintézist, és biztosra vehető, hogy nem döntőek a hangzás szempontjából.

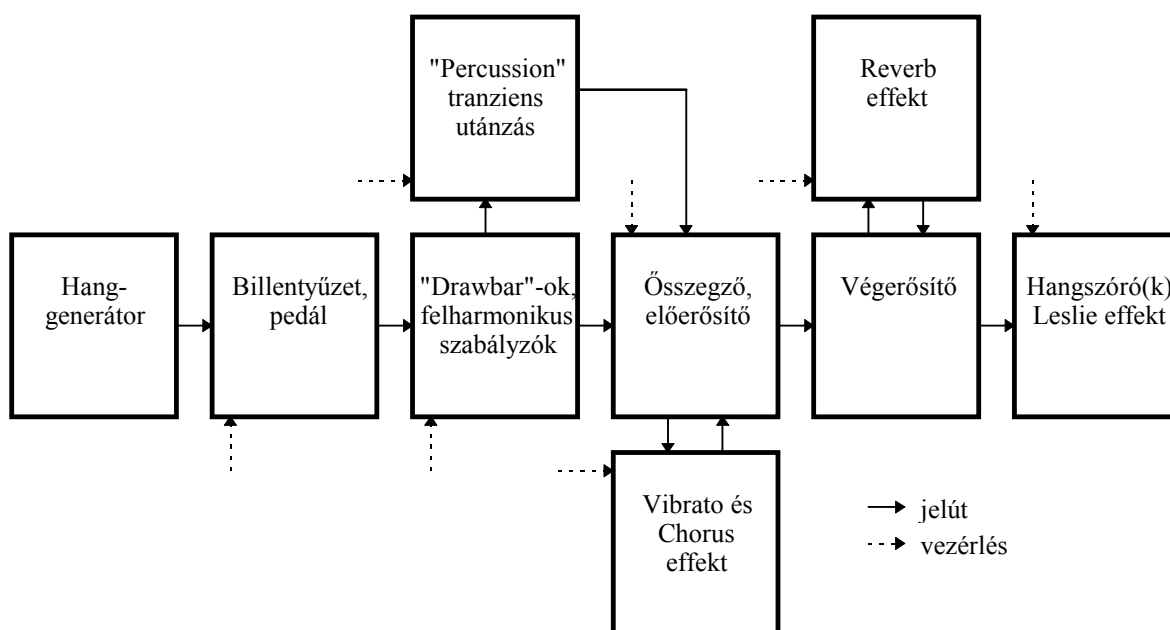
Összefoglalva elmondható, hogy a sípon kívül sok olyan tényező van még, amely az orgonahang végső karakterét meghatározza. Ezek elkülönítése azonban mérés-technikailag nehezen oldható meg, mivel az összes jellemzett paraméter csak az orgona felállítási helyén, egyszerre jelentkezik. A tényezők hatása azonban csak másodlagos, így elegendő őket a modellalkotás egy későbbi szintjén elemezni.

2. Az orgonahang szintetizálására irányuló eddigi kísérletek

Az előző fejezetben összefoglaltam az orgonasíp fizikáját, valamint az általa keltett hang műszaki és pszichoakusztikai szempontból lényeges paramétereit. Ebben a fejezetben az elektronika fejlődésével párhuzamosan létrejött eddigi szintézisek alapötletét és kivitelezését tekintem át, valamint az egyes modellek hatékonyságát vizsgálom az élethű hangzás szempontjából.

2.1. Az első modell: A Hammond-orgona

Az első komoly esély az orgona gazdaságosabbá (és hordozhatóvá) tételére a csöves elektronika elterjedésével jelent meg, az 1930-as években. Laurens Hammond 1934-ben szabadalmat jelentett be az Egyesült Államokban, elektromechanikus orgona gyártására. Ez volt az első kísérlet az orgonahang szintetizálására (jelenleg már nem gyártják). Az orgona egyik legbővebb változatának működési elve a 4. ábrán látható [Hammond A100 Manual].



4. ábra A Hammond-orgona blokkvázlata

A hangszer additív szintézist alkalmaz a hangelőállítás során. Az orgona leglényegesebb és egyben egyik legérdekesebb eleme az elektromechanikus hanggenerátor, amely a szintézishez szükséges szinuszjeleket állítja elő. (Ebben az időben már ismerték a tisztán elektronikus oszcillátort is, de ekkora mennyiségben, elhangolódás-mentesen előállítani még nem volt gazdaságos.) A generátor 91 darab mágneses térben forgó szinusz fogazatú fogaskerékből, tekercsből és LC szűrőből áll, az elektromechanikus átalakító elektromágneses elvű. A szinkron motoros hajtás következtében a kimenetekről levehető jel 91 darab viszonylag kis torzítású, stabil frekvenciájú szinusz [Sik, 1992].

Ezeket a jeleket úgy kötik rá a billentyűzetre, hogy minden egyes billentyű lenyomása a hozzá tartozó 9 harmonikus komponenst engedélyezze. Ezen harmonikusok aránya állítható,

egyszerre az összes frekvencián, a 'Drawbar'-ok segítségével. Az így súlyozott harmonikusokat egy transzformátor segítségével összegzik, majd az elektroncsöves fokozatokon keresztül kerül az eredő jel a hangszóróra.

Szót kell ejtenünk a kiegészítő áramkörökről, az effektekről, amelyek annyira jellegzetessé tették ennek az orgonának a hangját. A 'Vibrato' effekt a kész jelre tesz frekvenciamodulációt, a generátorhoz hasonlóan szintén elektromechanikus úton. A 'Chorus' effekt ugyanazon elven működik, de az így kapott frekvenciamodulált jelhez hozzáadja az eredeti, modulálatlan jelet is, így egyfajta lebegés alakul ki, ami a hangzás telítettség-érzését fokozza.

A végerősítőhöz tartozó Reverb egység ún. rugós zengető, feladata mesterséges zengés keltése. Működési elve azon alapszik, hogy egy mindkét végén rögzített rugót egyik végétől gerjesztve, a rugó akusztikus tápvonalként írható le, és kellően „elrontott” lezárások esetén a gerjesztés sokáig terjed ide-oda a rugón, miközben a kicsatolt energia megfelelő elektromechanikus átalakítóval levehető. Több rugóból álló csatolt rendszerrel pedig hatványozódik a visszaverődések száma, így 'n' rugó esetén n egydimenziós „térérzet” jön létre. [Takács, 1998]

A 'Percussion' egység viszonylag későn, 1955-ben került bele az orgonába, feladata az orgonasípok megszólalására jellemző kezdeti tranziens modellezése. A sípokra jellemző első (oktáv) vagy második (zenei körökben duodecimaként nevezett) felharmonikus alapharmonikusnál korábbi berezgését egy billentyűnyomásra triggerelt kapacitásvezérelt erősítővel modellezték. Az orgona rendszertechnikájából következően ez a trigger jel azonban csak az első billentyű lenyomására működött, ha egy már szóló hang mellé nyomunk le még egy billentyűt, a tranziens (ütő) hangzás nem jön létre, míg sípoknál természetesen a jelek egymástól függetlenek [Hammond FAQ site].

Még egy igen jellegzetes hatásról kell itt szót ejtenünk, a Leslie-effektusról. Egy igen egyszerű, de a hangzás szempontjából roppant hatásos jelenségről van szó, amely szinte elválaszthatatlan a Hammond-orgona jellegzetes hangjától. A végerősítő kimenetét nem egy álló hangszóróra vezetik, hanem egy olyanra, amely egy tengely körül forog. A létrejövő hanghatás elég összetett. A forgó hangforrás a Doppler-hatás miatt frekvenciamodulációt hoz létre, a hangszóró irányítottága periodikus amplitúdó-változást okoz, a hangszórók frekvenciafüggő iránykarakterisztikája a hangszínt is befolyásolja, valamint egy adott teremben a gerjesztés irányának változása rendkívül megnöveli a teremérzetet. A forgó hangszóró használatával egy "élő" hangot kapunk, és ez kellemesebb, változatosabb hangzást eredményez, mint egy álló hangszóró [Hammond Mailing List].

Összefoglalva elmondható, hogy a Hammond-orgona egy körültekintően, az adott kor lehetőségeit szinte maximálisan kihasználva megalkotott mérnöki alkotás. Jellegzetes hangjával bevonult a zenetörténelembe, de nem sikerült a sípos orgonát helyettesítenie (főleg Európában nem), helyette inkább a könnyűzenében és a Jazz-ben vívott ki magának elismerést. Ennek oka az, hogy a modell hangja nem elég sípszerű.

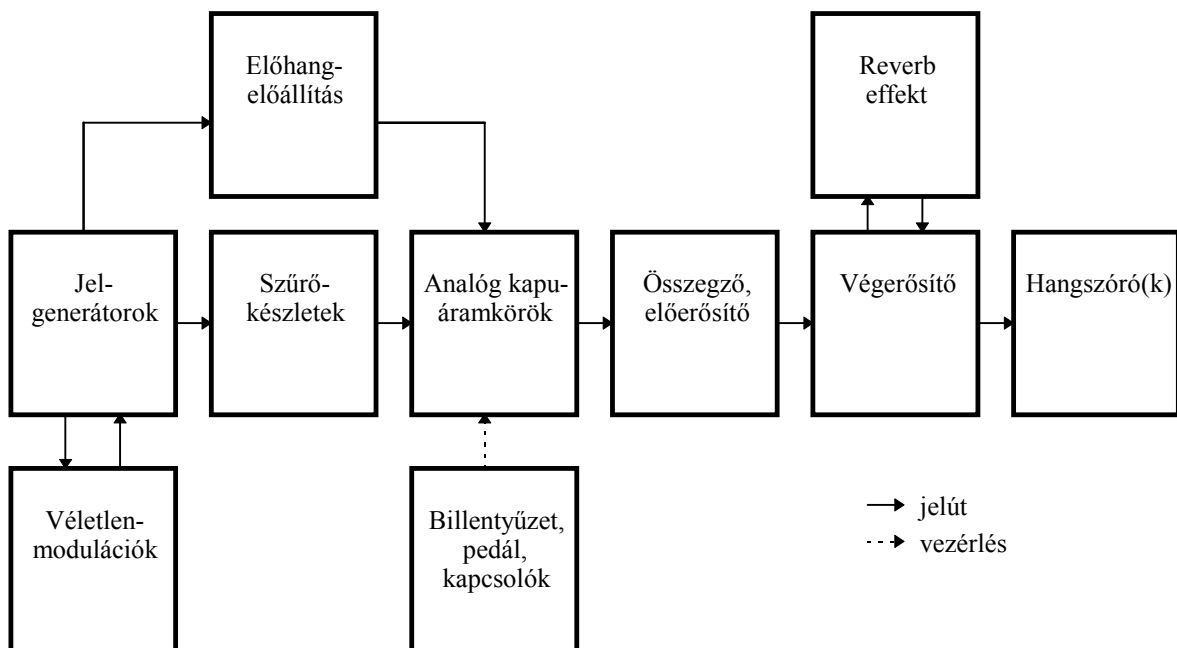
A hangszer hátránya, hogy a harmonikusok aránya az alapfrekvenciától független, míg valódi fizikai rendszereknél (és ahogy az első fejezetben is láttuk, a sípoknál is) ez az alapfrekvencia növekedésével csökken. Pontosan fogalmazva, ebben a hangszerben is találunk valami ehhez hasonló, ugyanis a legmagasabb hangoknál a 9. harmonikus nincs végig kiépítve, hanem a 8. harmonikus van helyette bekötve (a hangszer „repetál”, így elég a 91 generátor, 61 billentyűre.), de a sípoknál a változás más jellegű. Stacioner állapotban egy másik észrevehető hiba, hogy a hangokat egy közös generátor állítja elő, és így a billentyűk hatnak egymásra, a lenyomott billentyűk számától függ a hangszín.

További problémája a tranziensek hibája, ugyanis egy állandóan működő szinuszos generátor jelét tetszőleges időpontban téve a kimenetre, a billentyű lenyomásakor a jel „pattan”. Ez a pattanás az analóg áramkörök fázistolásai és véges sávszélessége (például az összegző transzformátor) miatt a hangszóróban jellegzetes, szelíd, főleg mélyfrekvenciás komponenseket tartalmazó „pukkanássá” (‘pop’) alakul, de így is jellegzetesen „Hammondos” a megszólalás, és ezt a fejlesztők sosem tudták észrevehetőtlenné tenni. A ‘Percussion’ effekt nagy problémája pedig a már fentebb említett egyszeri triggerelés.

A kvázistacionárius állapotot elősegítő "Reverb" és "Leslie" effektek ugyan nagyon hatásosak, de a sípok effajta jellemzői alapvetően más eredetűek, más jellegűek.

2.2. Analóg áramkörös orgonák

A Hammond-orgona sikerét követően és a hatására megújuló egyesült államokbeli könnyűzene igényeinek kielégítésére rendkívül felgyorsult az elektronikus hangszerek fejlesztése.



5. ábra Analóg áramkörös orgonák blokkvázlata

Megjelentek a tisztán elektroncsövet tartalmazó szintetizátorok, majd a tranzisztoros technológia elterjedésével az elektromos hangszerek kezdtek kisebbé, könnyebbé válni, és hatásfokuk is lényegesen javult. Újfajta szintézisek jöttek létre [Kruza, 1985]. Az elektromos orgonák területén elmondható, hogy a piac diktálta feltételeknek megfelelően, a sípos orgonákat utánzó hangszerek mellett sok, lényegesen egyszerűbb billentyűs hangszer jelent meg, mivel a könnyűzene igényeinek kevésbé kidolgozott hangzás is megfelelt. Sajnos, sok színházban, templomban és koncertteremben is ilyen, nagytömegben előállított (és ezért olcsó), de nem élethű hangú hangszert vásároltak komolyzenei célokra.

Voltak azonban továbbra is kutatások, amelyek az új lehetőségekkel próbálták az orgonát modellezni, mivel az igény továbbra is fennállt. A sokféle megoldás közös jellemzőit mutatja az 5. ábra.

Általánosságban elmondható, hogy ezeknél az orgonáknál nem additív, hanem szubtraktív

(kivonó) szintézist alkalmaztak. Egy ilyen hangszerben a jelgenerátorok nem tiszta szinuszjelet, hanem (nem teljesen szimmetrikus) négyszög, háromszög, fűrészjelet, vagy hiánytalan felhangsorú (pl. exponenciális felfutást tartalmazó) jelet állítanak elő. A szükséges mennyiségű alulfrekvencia megvalósítására többféle megoldás is fellelhető az irodalomban [Albert, 1980]. Az egyik lehetőség az, hogy minden hanghoz külön oszcillátort alkalmaznak. Ez nem gazdaságos megoldás. A másik véglet pedig az, amikor a rendszerben egyetlen oszcillátor van. Ebből az oszcillátorból speciális MOS áramkörrel előállítható a zenei skála 12 hangja, majd frekvenciaosztókkal az összes többi szükséges frekvencia létrehozható. Sok orgonagyártó alkalmazta ezt a módszert, ami kétségkívül olcsó, de több hátránya is van. Egyrészt az, hogy így az azonos hangmagasságú sípok teljesen szinkronban szólnak, az oktáv-, kvintregiszterek karaktere elvész, teljesen egybeolvadnak az alaphanggal, azaz nem alakul ki több sípsor bekapcsolásával az orgonára oly jellemző kóruszerű hangzás. Másik probléma, hogy az orgona kvint-, tercregiszterei a valóságban természetes hangolásúak, az ilyen elektromosan generált hangok pedig egyenletes lebegésű (temperált) skálát alakítanak ki. Az ilyen regisztereket bekapcsolva, az orgona alapregisztereinek felhangjai, és a felhangregiszterek összelebegnek, és kellemetlen interferenciákat okoznak. A harmadik ellenérv pedig az, hogy a hangszerek hangolása oktávra sem pontos, fellép az ún. oktávterpeszkedés jelensége, melynek lényege, hogy a fül magasabb ill. mélyebb frekvenciákon a pontosan kétszeres frekvenciatávolságot túl szűknek érzi, ezért a skála széleinél tudatosan nagyobb távolságra hangolják az egyes hangközöket [Tarnóczy, 1982]. Ezen megfontolások miatt az igényesebb modellekben köztes megoldásokat szoktak alkalmazni (pl. külön generátorok egy oktáv minden hangjára, külön a kvint-, terc-, szeptimregiszterekre, stb. [Albert, 1980]).

További jellemző az analóg elektromos orgonákra, hogy eltűnik a hangszínek beállításának, változtathatóságának lehetősége is, csak gyárilag beállított regiszterek közül lehet választani (természetesen, ez sípos orgonákban is így van). Az egyes regiszterek állandósult spektrumát oktávonként, vagy — igényesebb hangszereknél — akár féloktávonként eltérő szűrőkészletek állítják be. Így jól kézben tarthatók egyrészt a regiszterek közti különbségek, másrészt az egyes regisztereken belüli hangszínváltozások is.

A tranzisztoros, illetve a később megjelenő analóg integrált áramkörös kapcsolástechnika fejlesztésével egyre bonyolultabb, komplexebb jelenségek is utánozhatóvá váltak [Douglas, 1968] [Albert, 1976-78]. Ily módon az orgonasípok megszólalási jellemzői (tranziensek, előhangok) is jobban közelíthetők. Különböző sáv szélességű zajok, az egyes felharmonikusok gyorsabb megszólalása (ami bizonyos regisztereknél igen jellegzetes), illetve a megszólaláskor fellépő elhangolódási jelenségek is létrehozhatók.

Hasonlóképpen, a sípok kvázistacioner állapotának létrehozására is lehetőség van az analóg elektronika segítségével. Különböző kis modulációs mélységű frekvenciamodulációk, „lebegtetések” próbálják keltetni a természetesség érzését.

Külön problémát jelent egy komolyabb orgonamodellnél a mélyhangok visszaadása, ugyanis egy viszonylag nagy termet kell besugározni megfelelő teljesítménnyel, ugyanakkor a rendszer alsó határfrekvenciájának 16 Hz alatt kell lennie (ez a frekvencia megfelel a legmélyebb orgonasíp alulfrekvenciájának). A lehetséges megoldások közül szóba jöhet egy nagy teljesítményű basszreflex rendszer, vagy egy külön sugárzó subwoofer [Ahlborn orgelbau otlap], speciális ‘transmission line’ sugárzók, illetve hangolt rezonátoros mélyhangsugárzók alkalmazása [Albert, 1985] (ez utóbbi egy magyar szabadalom).

Ezekről az analóg áramkörös szintézisekről, különféle megvalósítási ötletekről részletesen lehet olvasni az irodalomban [Albert, 1980-87], így itt most nem részletezem őket.

Amint a fentiekből érezhető, analóg elektromos áramkörökkel már igen közel lehet jutni a sípos orgona hangjához, mindez csak az alkalmazott áramkörök bonyolultságától függ.

Ezeknek a szintéziseknek azonban korlátai is vannak. A diszkrét elemekből felépült kapcsolásoknak elsősorban működési, megbízhatósági problémáik voltak, amin a moduláris felépítés, majd később az analóg IC-k megjelenése segített. Egy másik problémacsoport pedig éppen a bonyolultságot korlátozza, ide tartozik a zaj és az áthallás. Az analóg kapcsolóelemek ugyan biztosítják a 100-120 dB elnyomást, de egy ilyen orgona belsejében a vezetékek szórt kapacitása, a zavarvédelem sokkal inkább meghatározó tényezők. A diszkrét félvezetők paramétereinek hőmérséklet-függése is korlátozhatja a rendszer pontosságát, stabilitását. Végezetül hátrányként említendő még, hogy egy kész analóg áramkör nem fejleszthető, beállítási lehetőségei egy határon túl nem változtathatók, így pontosabb modellhez új készüléket kell előállítani.

2.3. Digitális eljárások

Az 1970-es évek közepére a digitális technika fejlettsége elérte azt a szintet, hogy komoly vetélytársként lépjen fel az analóg zenei szintézisek ellen. Mivel kezdetben ezek a digitális áramkörök nem voltak képesek nagyobb foksámú szűrők valós idejű futtatására, ezért egyszerűbben előállítható szintéziseket alkalmaztak (pl. frekvencia-modulációs eljárások) [Fűrjes, 1996]. Ezek a szintézisek igen eredeti, hatásos hangzásokat tudnak előállítani, de akusztikus hangszerek modellezésére nem igazán alkalmasak, mivel paramétereik és a valódi hangszerek paramétereik között nagyon nehéz az összefüggéseket megtalálni.

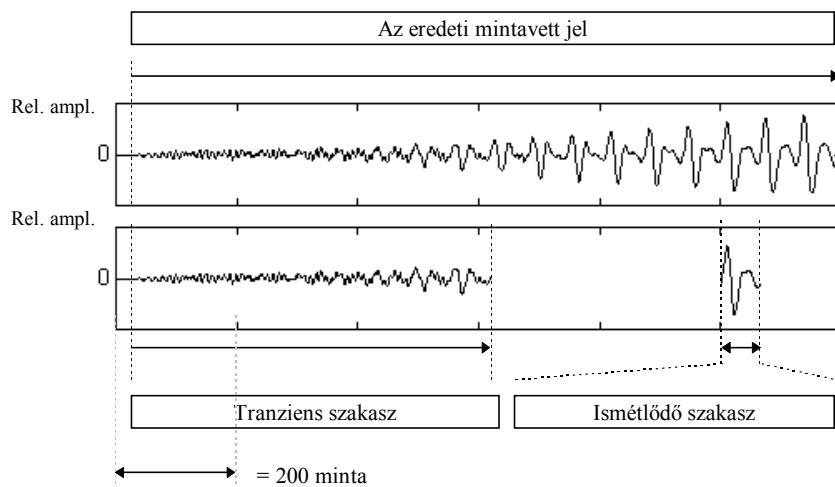
A következő alfejezetekben két — főként akusztikus hangszerek hangjának visszaadására kifejlesztett — digitális eljárást ismertetek. Az egyik a mintavétel-visszajátszás elve, amely manapság egyeduralgó mind a szintetizátorok, mind a digitális orgonák területén, a másik pedig a fizikai modellezés elmélete.

2.3.1. Szintézis digitális mintavételezéssel és visszajátszással

A mintavételezés-visszajátszás elvét már régebben kidolgozták, ám gyakorlati alkalmazása csak a megfelelő minőségű hangfrekvenciás A/D és D/A átalakítók megjelenése után terjedt el. Maga az elv igen egyszerű: úgy kapjuk a „legélethűbb” hangot, ha az eredeti hangszer hangját felvesszük, tároljuk és szükség esetén visszajátsszuk. Elméletileg ezt pl. analóg magnetofonokkal is megtehették volna, ám csak a digitális technika tudta megoldani a minőségromlás nélküli tárolást.

Ez az elv „mechanikusan” alkalmazva megköveteli, hogy a különböző hangmagasságokhoz és -erősségekhez különböző minták legyenek eltárolva. Ez a megoldás igen memóriagényes lenne, orgonáknál pedig, ahol több száz vagy akár több ezer síp hangját is rögzíteni kellene, kivitelezhetetlen. A hangminták tömörítésére az a jelenség ad lehetőséget, hogy a hangszerek legnagyobb részének a hangja felbontható egy kezdeti berezgési és egy periodikusan ismétlődő, kvázistacioner szakaszra. Amint azt az első fejezetben láttuk, első közelítésben az orgonasípok hangja is leírható ily módon. Ezért elegendőnek tűnik csak a berezgési folyamatot, valamint egyetlen periódust az ismétlődő szakaszból eltárolni. Lejátszáskor a tranziens szakasz után csak ismételtetni kell az eltárolt egyetlen periódust (amelyet „Sustain Loop”-nak is neveznek) (6. ábra), csak arra kell vigyázni, hogy az átmenetek simák legyenek, ne „kattogjon” a felvétel. Az imént vázolt megoldás az alapja a „Hullámtáblás” (Wavetable) szintéziseknek. (Gyengébb minőségű hangszereknél még azzal az egyszerűsítéssel is élnek, hogy csak az ismétlődő mintát tárolják el, és amplitúdó-burkolókkal közelítik a hangszer megszólalását is, nem csak a lecsengését.

Ez a megoldás nem túl jó minőségű, viszont nagyon kevés memória kell hozzá.) Ez a tárolási mód tranziens szakasz tárolással együtt is felvet bizonyos problémákat, amelyeket majd a fejezet végén foglalok össze.



6. ábra Orgonasíp mintavett jele és tárolása

További egyszerűsítést jelent, ha egy adott hangmintát nem csak az eredeti hangmagasságon, hanem más frekvencián is meg tudunk szólaltatni. Ezt gyorsabb ill. lassabb kiolvasással el is lehet érni. Az eljárás lényegében nem más, mint mintavételi frekvencia konverzió, amely a mai célhardverekkel könnyen megvalósítható valós időben. Ha a hangot „mélyíteni” szeretnénk, a mintákat lassabban kell kiolvasni, vagyis a kiolvasás lépésköze kisebb, mint az eredeti mintavételi periódus. Ilyenkor biztos, hogy interpolálnunk kell a köztes mintákat, de mivel az új mintavételi frekvencia nagyobb, mint az eredeti, így a mintavett jel eredeti sávszélessége „befér” az új frekvenciasávba, tehát átlapolódási probléma nincsen. Felfelé transzponáláskor azonban a jelenség fordított, az új mintavételi frekvencia kisebb, így az interpoláción kívül még sávkorlátozásra is szükség van.

Ezt a hangszintézist, amely manapság a legelterjedtebb, PCM-szintézisnek vagy „Sampling”-nek nevezik. Ezzel az eljárással megoldható, hogy csak féloktávonként, oktávonként, vagy még ritkábban tároljunk egy-egy hangmintát (ez megint csak minőség/ár arány kérdése). Túlságosan ritkán azért nem lehet, mert a gyorsabb-lassabb kiolvasással egyrészt a hang időtartama is nő/csökken, másrészt — és ez a nagyobbik probléma —, torzulnak a hangszer frekvenciafüggetlen formánsai, ezáltal a hangszer felismerhetetlen lesz. Részletesebb tárgyalás a PCM szintézisről az irodalomban található [Fűrjes, 1996], itt most a szintézis hibáit szeretném röviden összefoglalni.

Első pillanatban az elv tökéletesnek tűnik, sőt, első hallásra is meggyőző hangú akusztikus hangszerek szólnak egy igényesebb PCM hangszerből.

Az egyik probléma a kitarított hangoknál jelentkezik. A tárolási megoldás következtében a keletkező hang teljesen determinisztikus, kvarcpontosságú jel lesz, sőt, ha az eredeti hangszer tartalmazott zajjellegű összetevőt, akkor annak is ismétlődni fog az eltárolt szakasza, és rövid idő után bántóan gépiesnek tűnik a hang. Ez ellen úgy szoktak védekezni a gyártók, hogy egyrészt a kiolvasás pontosságát kismértékben "elrontják" (fázis- vagy frekvenciamoduláció alkalmazásával), valamint az eredeti zajt kiszedik a mintából, és lejátszás közben kevernek a hanghoz valamilyen jellemző sávszélességű zajt. Az általam eddig hallott hangszereknél azonban mindig észrevehető volt egyfajta ismétlődés, lebegés kialakulása, aminek okozója a

tárolt minta ismétlődő lejátszása.

A másik probléma a tárolással az, hogy egy ilyen hangszer mindig pontosan ugyanúgy szólal meg. A felvétel egy egyszeri tranziens folyamatot rögzít, és így a PCM-hangszer mindig azt az aktuális állapotot adja vissza. Ráadásul egy ilyen mintavételezett jel ismeretében nincsen egyetlen egy olyan paraméter sem a kezünkben, amellyel a berezgési folyamatot befolyásolni tudnánk, mivel kizárólag a minták állnak rendelkezésünkre, a hangszerre utaló fizikai paraméterek nélkül. Hangosabb-halkabb lejátszást gyakran próbálnak aluláteresztő szűrőkkel modellezni (például zongoránál), pedig sok esetben nagy hangerőn már sokkal jellemzőbbek a nemlineáris jelenségek (tipikus példa az imént említett zongora). Igaz, orgona esetében a hangerőváltozás nem játszik szerepet, azonban sokkal jellemzőbb a statisztikai ingadozás, ami az áramlási folyamatok eredménye. Vannak olyan kísérletek, amelyek több tranziens folyamat mintavételét tárolják, és azokból (véletlenszerűen) választanak, de alapjában véve a kötött struktúra nem támogatja a véletlenszerű jelenségek reprodukálását.

Az újramintavételezés, hangmagasság-változtatás igaz ugyan, hogy kevesebb memóriát igényel, de így módon azt érzük el, hogy nemcsak egy adott hang tranziense lesz determinált, hanem ez meghatározza a környező hangok paramétereit is. A már említett formánstorzulások is észrevehetőek, valamint a legtöbb hangszeren hallhatóak azok a hangszínváltások, amelyek az egyes tartományok között alakulnak ki.

Az imént felsorolt kifogások ellenére manapság az ismert, digitális orgonákat gyártó cégek kizárólag mintavételes orgonákat forgalmaznak. A különbségek csak a felbontásban (16-20 bit), esetleg a mintavételi frekvenciában (44.1 - 54 kHz), illetve a szolgáltatásokban (és ennek megfelelően az árban) jelentkeznek. Az Internetről letölthető anyagok alapján (ld. a címet az irodalomjegyzék végén) úgy tűnik, hogy a cégek közül csak az amerikai Rodgers és a németországi Ahlborn foglalkozik modelljeiben az orgonahang változatosságának figyelembevételével [Rodgers features] [Ahlborn profile], olyannyira, hogy modelljeik már messze túlmutatnak a PCM szintézisen, és hasonlítanak a 3. fejezetben leírt eljárásához.

2.3.2. A fizikai modellezés vizsgálata

Az eddig leírt hangszintézisek mind a hangszerek (és az orgona) hangjának modellezését, reprodukálását tűzték ki célul. Ezzel szemben a modellező szintézis túllép ezen, nem a hangot, hanem a hang keletkezési mechanizmusát vizsgálja, és ezt közelíti. Ennek a modellezésnek számos előnye van az eddig tárgyalt szintézisekkel szemben, de természetesen problémái is vannak. Egyik előnye, hogy a hangszer fizikai leírását ismerve, a hang keletkezéséhez szükséges paraméterek és a valódi hangszer vezérlése között igen egyszerű lehet az összefüggés (pl. egy orgonasíp modelljénél a síplámban lévő nyomás egy jó modellben is közvetlenül megjelenik, mint tényező). További előnye, hogy egy megfelelően precíz modell pontosan úgy viselkedik, mint az eredeti hangszer, tehát a keletkező hang is teljesen élethű lesz. Ebből következik az is, hogy a hangszermodell által nem egymástól független, különálló hangok keletkeznek, hanem az előző állapot(ok) hatnak az éppen aktuális hangra. Ezekkel a tulajdonságaival a fizikai modellezés szinte mindegyik vetélytársát felülmúlhatja a virtuális akusztikus hangszerek létrehozása terén [Fürjes, 1996]. Ebben a fejezetben röviden megpróbálom összefoglalni az orgonasípek fizikai modellezésének eddigi eredményeit és problémáit.

Az orgonasíp végeredményben felfogható úgy is, mint egy áramlási térben lévő "akadály". Ennek alapján született olyan fizikai modell, amely egyszerűen az áramlási teret leíró Navier–Stokes-egyenletet oldja meg, diszkrét időben, úgy, hogy a teret rácspontra osztja, és kezdeti

feltételnek a síp (vagy egyéb ilyen jellegű hangszer) paramétereit adja meg. Vagyis adott egy keskeny résen kiáramló, v_0 sebességű áramlás, adottak a térbeli peremfeltételek (a síp felső ajka, a sípfal), keressük a tér adott pontjaiban a hangnyomás időfüggvényét. Az eljárást meg is valósították, és mérésekkel össze is hasonlították az eredeti hangszerrel, de gyakorlati alkalmazhatósága nagyon kicsi, mert a zene szempontjából rengeteg felesleges adatot számol ki, ennek következtében rendkívül számításigényes, és valós idejű megvalósításának hardverköltése gazdaságtalan. [Skordos, 1995]

Egy használhatóbb, egyszerűsített fizikai modell létrehozása során a modellezendő hangszert célszerű funkcionális blokkokra felosztani. Egy ilyen általános felosztás lehet a következő:

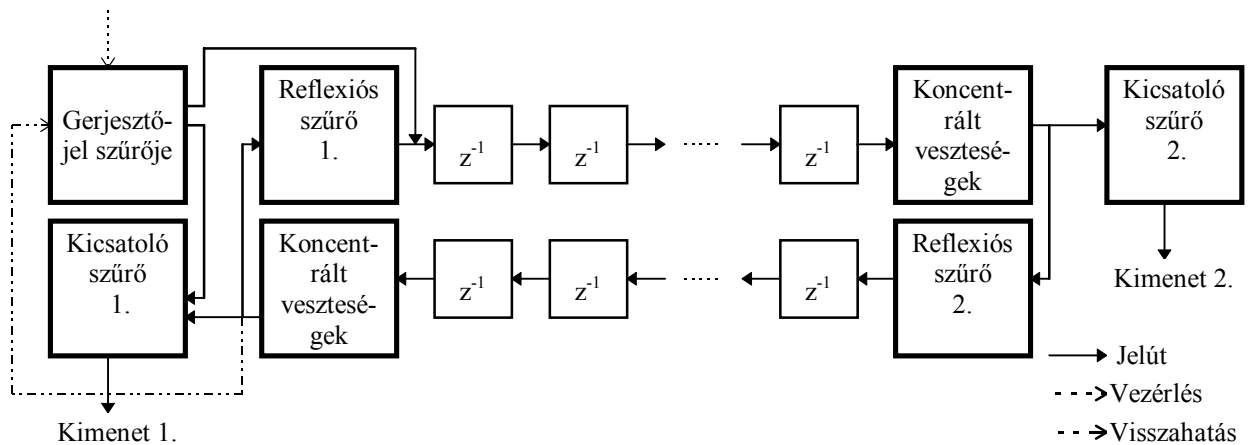
- rezgés-előállító, gerjesztő tag (a rendszer itt vezérelhető)
- rezgésformáló, spektrumalakító rezonátor tag
- a sugárzást elősegítő kicsatoló tag (a rendszer kimenete)

Az egyes blokkok közötti kapcsolatok azonban elég összetettek is lehetnek.

Ez a felosztás szinte közvetlenül alkalmazható az orgonasípok fizikai modelljének megalkotásához is. Az első fejezetben vázolt hangkeltési mechanizmus alapján belátható, hogy ajaksípnál az áramlás és a felső ajak kölcsönhatása által létrehozott ékhang, nyelv sípnál pedig a rezgő nyelv modellje lehet a gerjesztés. A síptest, illetve a tölcser modellezhető rezonátorként, a kicsatolás pedig ajaksípnál a sípszájnál és a síp felső nyílásánál, nyelv sípnál pedig a tölcser tetején jön létre.

A szakirodalom már 1885. óta részletesen foglalkozik az orgonasípok fizikai modelljének felállításával [Verge, 1995]. A különböző elméletek alapján történő hangszintézisek gyakorlati kivitelezésére azonban csak 100 évvel később, az 1980-as évektől kezdődően került sor. Napjainkban is erőteljes kutatómunka folyik a témában, többek között a franciaországi IRCAM-nál (Institut de Recherche et Coordination Acoustique et Musique, Centre Georges Pompidou, Paris, France).

A síp modellezésénél a kicsatolás megvalósítása nem okoz problémát, valamilyen frekvenciafüggő sugárzási karakterisztikát kell megvalósítani, amely digitális szűrővel egyszerűen implementálható. Első közelítésben a rezonátor sem túl bonyolult, az akusztikában már régóta ismert a (hosszához képest kis átmérőjű) rezgő légoszlop differenciálegyenlete, és analitikus megoldása, amely egy haladó és reflektált hullámra bontható fel [Horváthné, 1997]. Ennek egy egyszerű időtartománybeli szimulációját valósítja meg a Waveguide szintézis, amelyet legelőször gitárhúrra illetve klarinétra dolgoztak ki, de az akusztikai rendszerek analógiája miatt légoszlopra is alkalmazható. Azóta is a legtöbb ilyen típusú fizikai modell alapja ez a szintézistechnika. A modell az (egydimenziós) akusztikai rendszert tápvonalként írja le, és két, ellenkező irányú késleltető-lánccal helyettesíti (7. ábra). Az egyik irányba terjed a haladó, a másikba pedig a visszavert hullám. A lezárásoknál keletkező reflexiók és energiakicsatolások jól közelíthetők digitális szűrőkkel. A rendszer lineáris közelítése esetén a terjedés közben fellépő veszteségek összeadhatók, és koncentráltan vehetők figyelembe, ezáltal a számítási igény jelentősen lecsökken, sőt, az ábrán jól látható, hogy a hurokban lévő összes szűrő hasonló okból összevonható, így végeredményben nem kettő, hanem csak egy késleltető vonalat kell implementálni [Smith, 1993].



7. ábra A nyitott ajaksíp egyszerűsített Waveguide modellje

Sokkal nehezebb — főleg ajaksípek esetében — modellezni a hang keletkezési mechanizmusának egyik leglényegesebb elemét, az ékhang-generátort, valamint a rezonátor és a generátor közötti kölcsönhatásokat. Az irodalomban számos elmélet foglalkozik ezekkel a problémákkal, és ezen elméletek alapján készítették is (valós idejű) szimulációs programokat [Välimäki, 1992] [Verge, 1995]. Közös jellemzőjük, hogy — ugyan egyszerűsített akusztikai modellek alapján, de — valós időben szólnak, némelyik igen meggyőzően. A megvalósítások elméleti háttére azonban bonyolult áramlástani, akusztikai méréseket, levezetéseket foglal magába, amelyekről az imént említett szakirodalomban részletesen olvashatunk, így itt most nem térek ki rájuk.

A fizikai modellezés — amint azt már említettem —, elméletileg tökéletesen adja vissza a modellezendő hangszer hangját. A piacon található hangszerek közül azonban kevésben találunk fizikai modell alapú algoritmusokat, illetve azok egyszerűsített változatát. Ennek egyik legfőbb oka az, hogy még az egyszerű fizikai modellek hardverigénye is nagyon nagy, többszörös polifónia-fokkal (amikor egy időben több hang szól) pedig még nehezebb követelményeket állítanak a mai hardverek elé.

A fizikai modell alapú szintézis másik nagy problémája pedig a helyes modell megtalálása, a valódi hangszer döntő paramétereinek megtalálása és a modellbe való leképzése. Egy-egy jó modell megalkotásához ugyanis különböző tudományterületek együttes ismeretére van szükség, és úgy kell a kapott modellt egyszerűsíteni, hogy a létrejövő hangszer hangja élethű maradjon. A jelenlegi fizikai modellek nagyon leegyszerűsített modellek. Előnyük, hogy a tranziens jelenségeket jól modellezik, de a zenészek véleménye szerint a stacioner állapot szimulációja — az első közelítésben lényegtelennek tűnő részletek elhanyagolása miatt — még nem eléggé meggyőző [Verge, 1995].

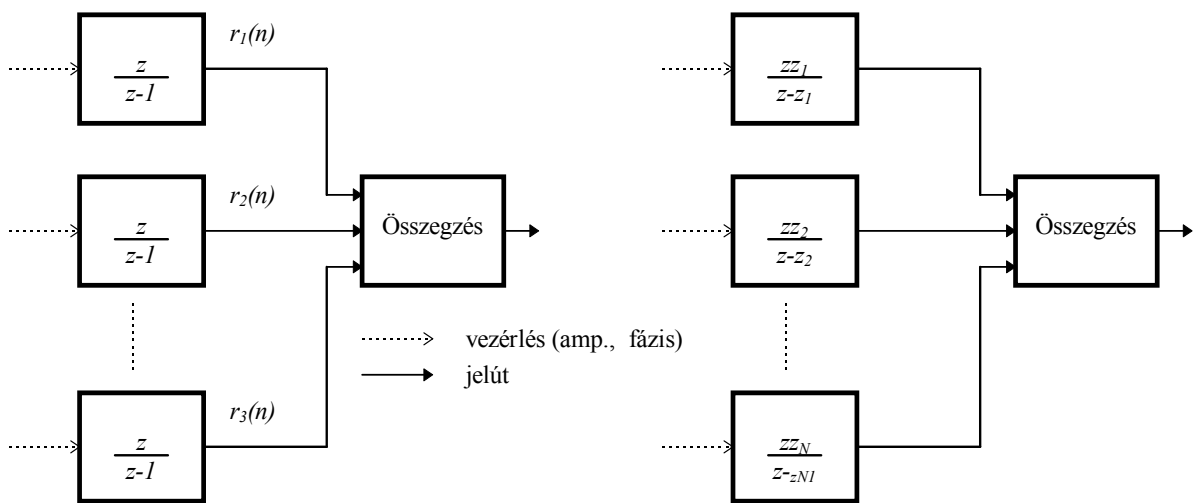
3. Az alkalmazott modell ismertetése

Az orgona hangjának idő- és frekvenciatartománybeli jellemzői (1. fejezet) alapján vizsgálva az eddigi szintéziskísérleteket (2. fejezet), megállapítható, hogy olyan modell nagyon kevés van, amely a pszichoakusztikai és műszaki szempontból fontos jellemzőket tartalmazza, ugyanakkor gazdaságosan megvalósítható. Az egyik ilyen lehetőség a már említett két orgonagyár (Rodgers és Ahlborn) által kikísérletezett, továbbfejlesztett PCM szintézis (2.3.1. fejezet), amelynek működési mechanizmusáról (érthető okokból) nem találtam részletes információt, a másik megoldás a fizikai modellezés lehetne, amelynél a helyes modell megtalálása elméleti nehézségeket, valós idejű megvalósítása pedig gyakorlati korlátot jelent.

Ebben a fejezetben egy olyan jelmodell kerül ismertetésre, amely kompromisszumot jelent a hangminőség és a számítási igény között, ugyanakkor rugalmas, vagyis könnyen továbbfejleszhető különböző szintű igények kielégítésére.

3.1. Periodikus jelek modellje

Jól ismert, hogy minden periodikus jel egyértelműen megadható komplex Fourier-sorával. Egy ilyen (diszkrét idejű) jelgenerátor elméleti modelljének vázlata és időinvariáns leírása látható a 8. ábrán.



a./ Periódikus jel modellje

b./ A jelmodell, mint diszkrét rendszer

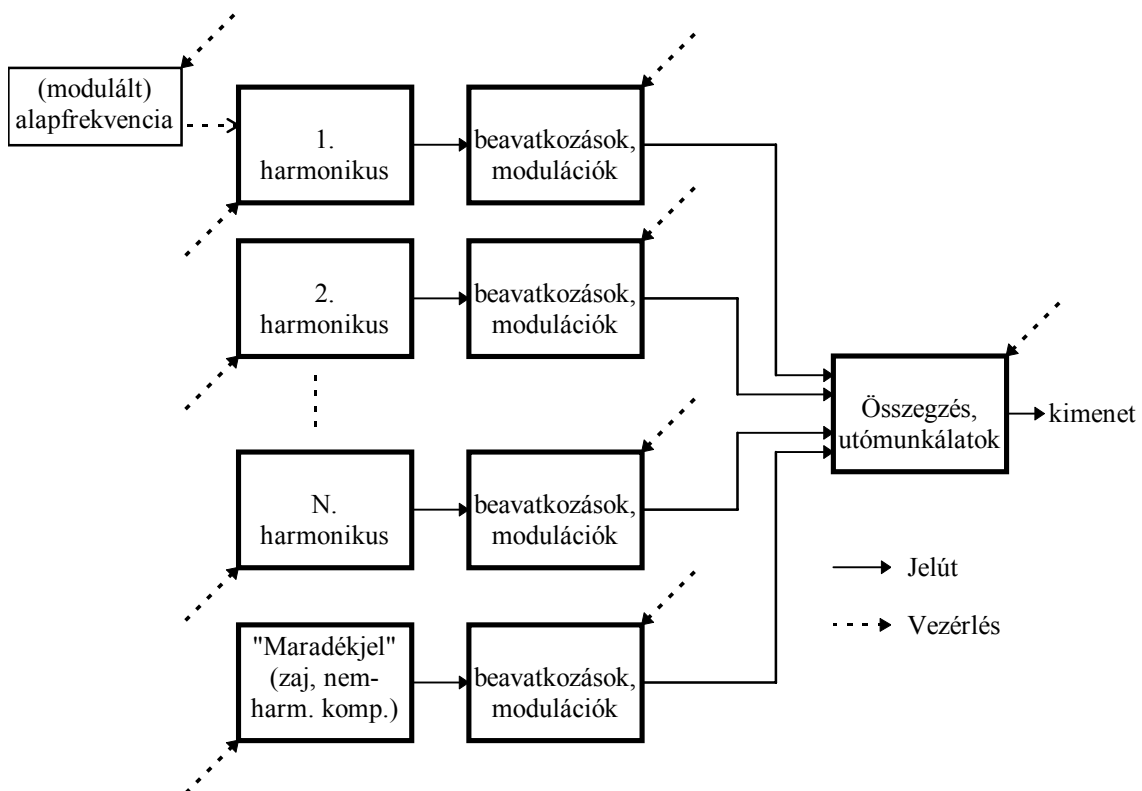
8. ábra A koncepcionális jelmodell

A periodikus jel modellje végeredményben nem más, mint egy jelgenerátor, amely (a mintavételes rendszerek követelményét betartva) sávkorlátozott jelet állít elő, N darab komplex vektor összegeként (8.a ábra). Működési elve, hogy ha az N integrátor bemenetére egységimpulzust kapcsolunk, akkor azok kimenetén egységugrás-függvény jelenik meg. Ezeket az állapotváltozókat szorozva a megfelelő komplex vektorokkal ($r_i(n)$), majd összegezve, a kimeneten megjelenik a periodikus jel. Az amplitúdó- és fázisviszonyokat a kezdeti feltételek határozzák meg. A modell időinvariánsan is leírható (8.b ábra). Az így keletkező diszkrét rendszerről belátható, hogy N pólust tartalmaz az egységkörön. A periodikus jelek ilyen leírásának előnye, hogy ily módon tetszőleges jelgenerátor beilleszthető

a digitális jelfeldolgozó rendszerek által használt diszkrét idejű rendszertechnikába [Péceli, 1986].

3.2. A jelmodell alkalmazása hangszermodellezésre

A modellezés alapgondolata az, hogy közelítsük a hangszerek hangját a periódikus jelekre jellemző spektrum vonalassal, harmonikus szerkezetével. Ez a leírás a zenei hangszerek többségére fennáll. Az egyéb, nemharmonikus komponensek és a — különösen fuvola-szerű hangszerekre jellemző — zajjelenségek "maradékjelként" adhatók meg. A hangszer hangja — lineáris rendszert feltételezve — az egymástól független komponensek összegzésével alakul ki. A különböző hangszerek egyedi jellegzetessége az egyes összetevők paramétereinek inicializálásával, illetve folyamatos változtatásával alakítható ki. A hangszereknek az előző fejezetben részletezett jelmodell közvetett felhasználásával történő leírásának blokkdiagramja látható a 9. ábrán.



9. ábra A jelmodell alkalmazása hangszermodellzésre

A hang felépítésének ilyen jellegű megközelítése nem újdonság, a kezdeti analóg szintetizátorok (klasszikus Fourier-szintézisek) is ezt a hangkeltési mechanizmust alkalmazták [Kruza, 1985], ezek azonban ritkán tudták az egyes felharmonikusok paramétereit külön-külön állítani, valamint egy-egy akusztikus hangszer modellezéséhez nem voltak elég rugalmasak.

Az irodalomban található digitális szintézisek közül a F.A.R.-nak (Fourier Analysis and Resynthesis), vagy más néven Reszintézisnek nevezett eljárás már sokkal inkább hasonlítható az itt bevezetendő ötlethez [Fűrjes, 1996]. A F.A.R. szintézis során egy akusztikus hangszer hangfelvételét először ablakolják, elemzik (Fourier Analysis), a spektrum fő komponenseit eltárolják, majd az eredeti jelből kivonva ezeket a komponenseket, a maradék jelet („zajt”) is

eltárolják. Reszintézis során a komponenseket újra előállítják, majd összeadva a zajjal, az eredményként kapott jel a felvett hangszer hangja.

A most alkalmazott szintézis azonban egy lényeges pontjában biztosan eltér a F.A.R. eljárástól. Az általam vizsgálandó jelmodell ugyanis **nem egy** (determinisztikus) mintavett **jelet állít vissza, hanem** a modellezendő akusztikus hangszer által generált hang tulajdonságaival megegyező **hangot generál**. Így a modell és az összes általa előállított hang is egyedi lesz, ugyanúgy, ahogy egy igazi akusztikus hangszernél.

Ez a fajta modellezés viszont megköveteli a szintetizálni kívánt hang paramétereinek részletes elemzését. Az első fejezetben orgonasípok hangjára ezt a vizsgálatot meg is tettem. Az ott kapott jellegzetességek elvi megvalósítási lehetőségeit tekintem át a következő alfejezetekben.

3.1.1. Harmonikusok előállítása – az állandósult spektrum

Az orgonasípok által generált hangnak véges számú detektálható felharmonikus komponense van, különböző relatív amplitúdóval és fázissal. A harmonikusok száma és aránya azonban regiszterenként különböző, sőt, az egyes regisztereken belül is változik. Ennek megvalósítása nem jelent problémát, az egyes sípokhoz szükséges adatok táblázatosan eltárolhatók, és egy adott síp hangjához szükséges adat könnyen előhívható. A relatív amplitúdók úgy alakíthatók ki, hogy az egyes felharmonikusokat megszorozzuk a neki megfelelő amplitúdóval. Ha a harmonikusokat komplexen állítjuk elő, akkor a fázisviszonyok is könnyen beállíthatók, komplex szorzással, a következőképpen

$$A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) = \operatorname{Re} \{ A_n e^{j\varphi_n} e^{j\omega_n t} \} \quad (5)$$

ahol A_n és φ_n az n . harmonikus amplitúdója és fázisa, ω_n pedig az n . harmonikus frekvenciája.

Megjegyzendő, hogy nem is feltétlenül szükséges, és nem is kivitelezhető az összes síp ilyen jellegű paramétereinek meghatározása méréssel, mert a változások szabályszerűségének felismerésével köztes sípok amplitúdó-arányai megbecsülhetők (pl. a Bourdon regiszter 2. harmonikusának erősödése, vagy a 3. harmonikus csökkenése (M.1.6. ábra)). Természetesen ez az összes további paraméterre is igaz. Ezeknek a táblázatoknak az elkészítése a dolgozat beadásakor azonban még folyamatban van.

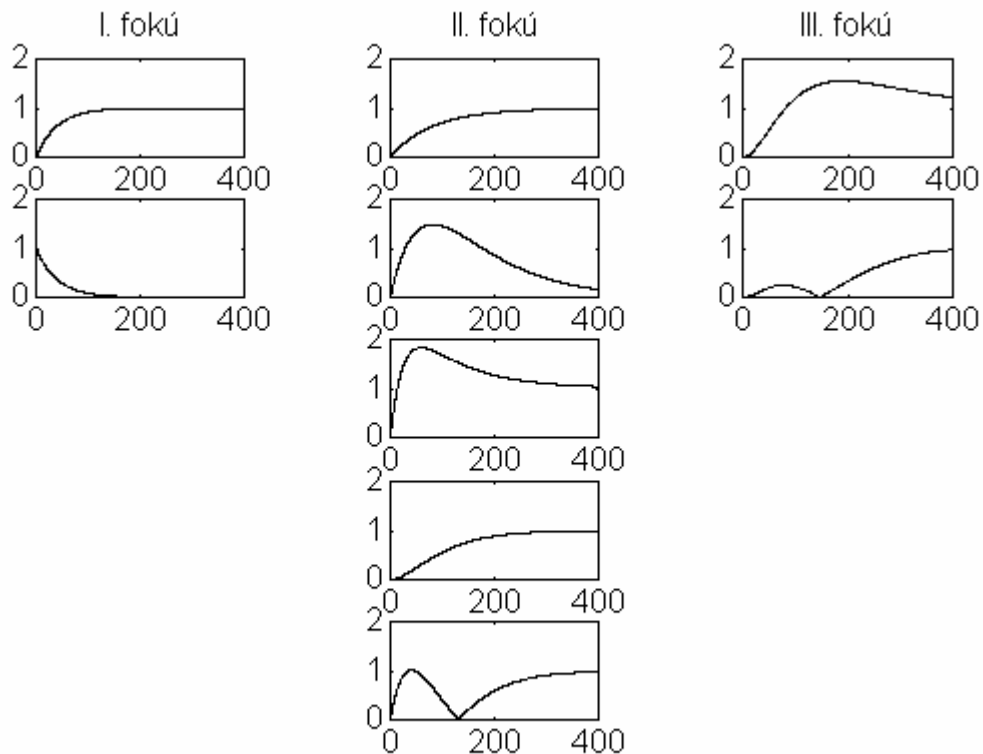
Fontos itt megemlítenünk a relatív fázisok figyelembevételének szükségességét. Különböző fáziseltéréssel összeadott komponensek ugyan más-más jelalakot eredményeznek, azonban állandósult állapotban az emberi fül ezt nem detektálja [Tarnóczy, 1982]. A szintézis során a jelenség tényleg megfigyelhető volt. Három okból azonban mégis bele kellett tenni a modellbe a fáziseltérések számítását. Az egyik az, hogy azonos fázisban összegzett szinuszok nagy csúcstényezőt eredményeznek, és ez feleslegesen terheli a rendszert. Továbbá tranzienis folyamatoknál különféle fáziseltérések különböző érzetet keltenek, ezeknél a folyamatoknál tehát az emberi hallás detektálja a fázist. A harmadik szempont pedig az, hogy a nyitott sípok két nyílása eltérő fázisban sugározza az egyes komponenseket, így teljesen más interferenciás komponensek alakulnak ki, mintha azonos fázisban összegeznénk őket.

Ezen indokok miatt az állandósult állapotra jellemző relatív amplitúdót és fázist is tartalmaznia kell a modellnek. Az állandósult állapotbeli zajjelenségeket a 3.1.3. fejezetben tárgyalom.

3.1.2. Burkolók – tranziensek

Ahogy azt már korábban említettem, a hangszerek felismerhetősége szempontjából fontos a tranziens jelenségek kialakítása. A modell a tranziens jelenségeket az egyes felharmonikusokra és a zajjelre függetlenül számolható burkológörbékkel szimulálja. Az 1.2.3. fejezet részletes elemzéséből és a hozzá tartozó melléklet megfelelő ábráiból (M.2.1-8) látható, hogy elméletileg valóban jól közelíthetők ily módon a tranziens jelenségek. Az viszont, hogy egyéb, figyelembe nem vett jelenségek vannak-e a berezgési folyamat során, csak fülrel történő összehasonlítással dönthető el.

Az egyes burkolókat visszacsatolt IIR szűrőkkel könnyen meg lehet valósítani, ezért a modell implementálása során is ilyeneket alkalmazok. A következő ábrán látható, hogy különböző fokú IIR szűrők által milyen jelformák generálhatók (10. ábra).



10. ábra IIR szűrők által előállítható burkolók

Összevetve ezeket a tranziens jelenségeket az (M.2.5.) és (M.2.7.) ábrával, kikövetkeztethető, hogy melyik az a minimális foksám, amely megfelelően tudja közelíteni egy síp harmonikusainak burkolóját. Az egyik leggyakoribb burkolótípus jellemzője, hogy nulla meredekséggel indul, egyszer túlleng, majd beáll arra a stacioner amplitúdóra, amelyet az állandósult spektrum vizsgálatánál már egyszer figyelembe vettünk. Ez azt jelenti, hogy a burkológörbe-generátornak nem erre az amplitúdóra, hanem egyre kell beállnia (ez kevésbé lényeges, mivel csak egy konstanssal való szorzást jelent). Ezt a három feltételt (nulla meredekség, túllövés, egyhez tartás) csak minimálisan harmadfokú szűrőnél tudjuk egymástól függetlenül változtatni, tehát a rendszerben ilyen szűrőket kell alkalmazni. Másodfokú szűrővel túllövés esetén a meredekségi feltétel nem teljesül, nulla meredekségnél pedig a túllövést nem lehet beállítani.

Problémát jelenthet viszont egy olyan felharmonikus, amelynél úgy látszik, hogy először berezdeg, majd a rezgés elhal, és újraindul. Ilyen például az M.2.9. ábrán az $f_0=348.23 \text{ Hz}$ alapfrekvenciájú síp IV. felharmonikusa. Ez a jelenség modellezhető olyan szűrővel, amely olyan pólusokkal rendelkezik, hogy a végleges beállítás előtt a szűrő kimenetének amplitúdója egyszer átleng negatívba. Burkolóként használva a kimenetet, ez természetesen abszolút értéként jelenik meg, de a negatív burkoló fázisfordítást okoz a jelben. Két ilyen megvalósítási lehetőséget tüntet fel a 10. ábrán, az egyik másodfokú, a másik harmadfokú szűrővel realizálható. Ez a megoldás azonban nem tökéletes, mert így nagyobb fokszámú szűrő használata esetén sem indulhat a második berezdegés nulla meredekséggel, és az előbb említett fázisfordítás sem biztos, hogy kívánatos. Egy másik lehetőség az, hogy az első berezdegést nem a harmonikus komponensből állítjuk elő, hanem a síp zajának az adott felharmonikus sávjába eső részéből.

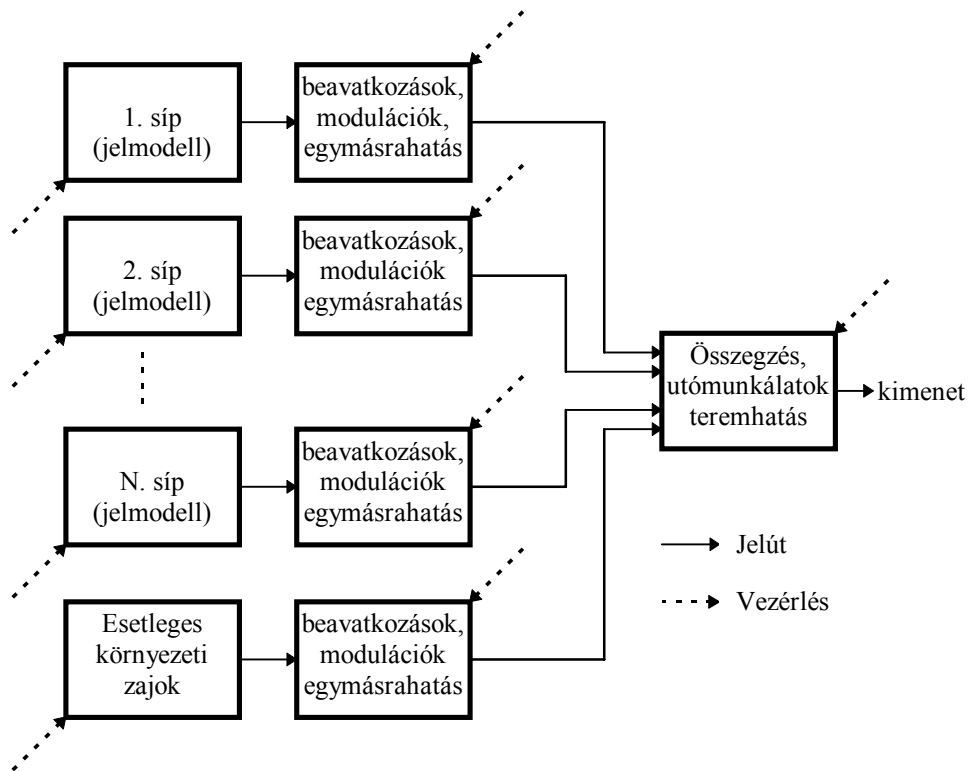
Az alfejezet összefoglalásaként elmondható, hogy az orgonasípok tranzienis jelenségeinek modellezéséhez harmadfokú IIR szűrőket kell alkalmaznunk. Bizonyos jelenségek még így sem szintetizálhatók, de lehetséges, hogy nem is kritikusak a hangzás élethűségének szempontjából. Ez csak füllel történő összehasonlítással dönthető el.

3.1.3. Modulációk, zaj – kvázistacioner állapot, véletlen jelenségek

Az orgonasípok hangjának véletlen modulációit és a zajtermelést együtt érdemes figyelembe venni, mivel a frekvenciatartományban nagyon nehezen választhatók szét. Két — az első fejezetben már részletesen kifejtett — megoldás is kialakíthatja a kívánt jelalakokat. Az egyik megoldás az, hogy sávkorlátozott fehérzajt engedünk át egy olyan szűrőn, amely a vizsgált síp spektrumcsomósodási helyein kiemeléseket mutat. Ilyen szűrőt IFFT módszerrel lehet — akár automatikusan is — tervezni. Ennek problémája a linearitás feltételezése. A másik megoldás az, hogy az egyes felharmonikusokat keskeny sávszélességű zajjal amplitúdó-moduláljuk, és az energiacsomók így jönnek létre. Ennek problémája lehet egyrészt az, hogy mindegyik harmonikushoz kell egy keskenysávú aluláteresztő szűrő, amely létrehozza a moduláló jelet, másrészt pedig az, hogy ily módon csak a harmonikusok köré tudunk spektrumcsomókat tenni, márpedig az orgonasípoknál — főleg a magasabb harmonikusok környékén — az energiacsomók elég messze kerülhetnek a harmonikus komponensektől. Ebben az esetben még külön kell gondoskodnunk a síp szélzajának megvalósításáról.

Azt, hogy melyik megoldás hatékonyabb, illetve milyen mélységben szükséges egyáltalán szintetizálni a véletlen jelenségeket, csak a szimulációs kísérletek kimenetének elemzése során lehet majd eldönteni.

3.1.4. Külső körülmények



11. ábra A jelmodell lehetséges következő hierarchikus szintje

Az (1.2.5.) fejezetben tárgyalt, az orgona hangjának végső képét kialakító környezeti hatások (terem, többi síp) egy ilyen jelmodellbe nem illeszthetők bele, mivel ezek a hatások a sípon kívül, a már kialakult hangot módosítják. A modell hierarchikus rendszerbe illesztésével viszont ezeket a hatásokat is figyelembe tudjuk venni (11. ábra). A modellezés jelenlegi szintjén azonban ezen körülmények hatását nem vettem figyelembe, azonban a későbbiekben ebbe az irányba az elméleti modell továbbfejleszhető.

3.2. A modell megvalósítási lehetőségei, eddigi eredmények

A 3.1. fejezetben leírt jelmodell megvalósítása többféleképpen is megoldható. Szimulációs elemzésekre kiválóan használható MatLab fejlesztői környezet, amely a kapott eredményeket rögtön ki tudja értékelni mind az idő-, mind a frekvenciatartományban. Hátránya, hogy viszonylag lassú, mivel általános célra készült, viszont a végleges paraméterek jól tesztelhetők vele.

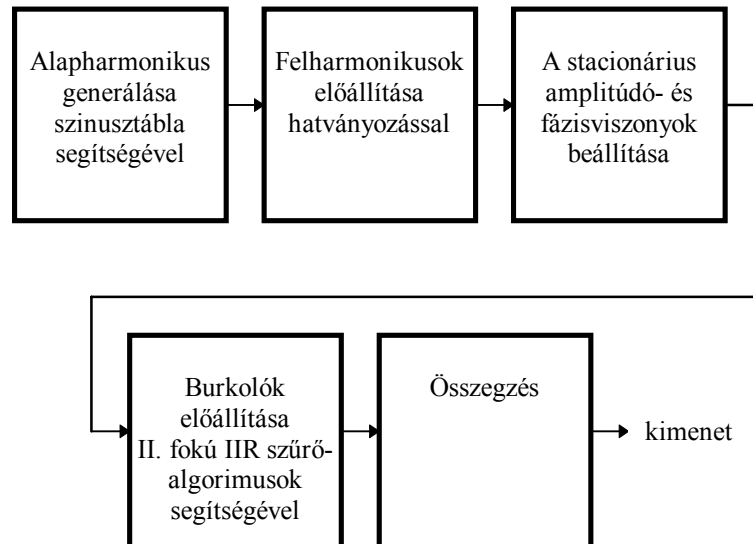
A jelenlegi gyors hardverek lehetővé teszik azt is, hogy személyi számítógépre írjunk célprogramot, amely generálja a sípmodell hangját. Viszont ezeknek a processzoroknak az architektúrája nem ilyen célra optimalizált, ezért valós idejű hangszintézist nagyon nehéz rajtuk megvalósítani.

Valós idejű szimulációra szinte kizárólag a digitális jelfeldolgozó processzorok alkalmasak. Felépítésük, architektúrájuk és utasításkészletük rendkívül elősegíti a modellezéshez szükséges részfeladatok megoldását (pl. beépített szinusztáblát tartalmaznak, szűrések végrehajtását elősegítő utasításokkal rendelkeznek).

Éppen ezért az ebben a fejezetben részletezett modell hatékonyságát egy PC-s fejlesztői környezetben lévő Motorola jelfeldolgozó processzort tartalmazó kártyával vizsgálom. A

maximális hatásfok érdekében a processzorra írt program assembly nyelven készül.

A program fejlesztése folyamatban van. A jelenleg már stabilan működő algoritmus a 12. ábrán látható.



12. ábra A jelmodell-algoritmus jelenleg implementált változata

A program a processzorban lévő szinusztabla felhasználásával állítja elő a modellezendő síp alaphfrekvenciáját. A kis torzítás érdekében az egyes minták közötti értékeket — amennyiben szükséges —, interpolációval határozom meg. Az interpoláció a szinuszfüggvény elsőfokú Taylor-soros közelítését használja fel. Pontosabb közelítésre azért nincsen szükség, mert a processzor számábrázolási tartománya, dinamikatartománya korlátoz.

A valós idejű szimuláció hatékonyságának növelése érdekében az egyes felharmonikusokat hatványozással állítom elő, a következő rekurzív formula alapján:

$$\cos(2\pi k \frac{f_n}{f_s}) = \text{Re} \{ e^{j2\pi k f_n / f_s} e^{j2\pi k f_0 / f_s} \} \quad (6)$$

ahol k a diszkrét idő, f_s a mintavételi, f_0 az alaphfrekvencia, f_n és f_{n-1} pedig az aktuális és az előző harmonikus frekvenciája.

Igaz ugyan, hogy ehhez a formulához elő kell állítani minden harmonikus szinuszt is, de ez azért jó, mert így az egyes harmonikusok relatív amplitúdóját és fázisát az (5) egyenlet alapján lehet beállítani.

Az egyes felharmonikusokra illeszthető burkológörbét másodfokú szűrőkkel realizáltam, de a struktúra úgy készült, hogy az algoritmus könnyen továbbfejleszhető a szükséges harmadfokú IIR szűrő implementálásához. A másodfokú szűrő a hagyományos direkt megvalósítással készült, vagyis

$$y[k] = b_0 x[k] + b_1 x[k-1] + b_2 x[k-2] - a_1 y[k-1] - a_2 y[k-2], \quad (7)$$

ahol k a diszkrét idő, $y[k]$ a burkoló, $x[k]$ pedig a burkológenerátort vezérlő paraméter. Mivel a síp energiamentes állapotból indul, ezért a b_0 paraméter mindenképpen nulla. Így a paraméterek számát és a számítási időt is sikerült csökkenteni. Mivel minden felharmonikusra külön kell számolni a burkolókat, ezért egy-egy ilyen megoldás is jelentősen javíthatja a modell hatásfokát.

Az egyes felharmonikusok kiszámolt mintáinak összegzése után a processzor a harmonikus periodikus jelet kiteszi a D/A átalakítóra, amelyen keresztül oszcilloszkóp és hangszóró segítségével a kész jel láthatóvá és hallhatóvá válik.

A program Motorola 56001 processzort tartalmazó kártyán fut, az eddig megvalósított modell-elemeket 28 kHz-es mintavételi frekvenciával tudja kiszámolni valós időben. Félő, hogy ez a jelfeldolgozó processzor a program bővítésével nem fogja tudni majd valós időben szintetizálni a hangot. Ebben az esetben nagyobb teljesítményű processzort kell alkalmazni erre a feladatra.

A dolgozat megírásakor a már elkészült program tesztelése mellett, folyamatban van a felharmonikusok berezgéséhez szükséges paraméterek számszerűsítése MatLab program segítségével. Ezen paraméterek kinyerése után lehet vizsgálni komolyan a jelmodellt abból a szempontból, hogy mennyire közelíti meg egy valódi síp hangját. A jelenleg működő programrészlet paramétereit állítgatva az eddigi tapasztalat az, hogy bizonyos beállítások mellett a keletkező hang megszólalása egész életszerű, azonban a stacioner állapot túlságosan egyhangú, tehát bizonyos mértékű modulációkra, zajjelenségekre biztosan szükség lesz.

4. Összegzés, kitekintés

A dolgozat előző fejezeteiben az orgonahang szintézisének lehetőségeit, nehézségeit, valamint a témában általam végzett kutatómunka és szintézis-kísérlet jelenlegi állapotát foglaltam össze.

Az irodalom régóta tartó tanulmányozásának egyik legértékesebb eddigi tanulsága, 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 az alapötlet fogja meghatározni. Sokkal fontosabb — és ugyanakkor lényegesen nehezebb is — a hangszer pszichoakusztikai szempontból fontos paramétereit megtalálni, objektíven megadni, valamint a hangszer és a modell paramétereinek közötti transzformációt megtalálni.

Ugyanakkor az is tény, hogy élethű hang szintéziséhez — függetlenül a modellezési eljárásától —, valamilyen szinten mindenképpen tanulmányozni kell a hangszer által generált hang létrejöttének körülményeit, fizikai hátterét. Csak így érhető el ugyanis, hogy a szintetizált hang paramétereit az eredeti hangszerhez hasonló módon tudjuk strukturálni, súlyozni. Egy ilyen módon létrehozott modell hangja sokkal természetesebb lesz, és sokkal inkább hasonlítani fog az eredeti hangszerre azokhoz a modellekhez képest, amelyeknél ilyen vizsgálatot nem végeznek.

A dolgozat címében kitűzött feladat megvalósításához ezek szerint — a szintézist megelőzően — körültekintő analízist kell végezni. Ezért foglalkoztam a dolgozat elején olyan részletesen az orgonasípok hangjának paramétereivel, illetve a jelenségek fizikai hátterével. Egy másik szempont volt az, hogy objektíven értékelhetőek legyenek a feladat megoldására kifejlesztett eddigi megoldások, illetve összevethetőek legyenek az általam bevezetett jelmodellel.

A feladat analízis része abból a szempontból már befejezettek tekinthető, hogy a szintézishez szükséges fontosabb jellemzők felmérése és csoportosítása nagyjából megtörtént. Hátra van még ezen jellemzők táblázatos kiértékelése, valamint az egyes paraméterek leképzése (pl. a síp felharmonikus-burkolóinak alapján a modell szűrőparamétereinek meghatározása). Ezeknek a feladatoknak a végrehajtása a közeljövő egyik legfontosabb célkitűzése, mivel a szintézis csak az így kapott paraméterekkel tesztelhető.

A további feladatok közé tartozik a jelmodellt megvalósító program fejlesztése (modulációk, zajjelenségek), és a paraméterek véglegesítése, legfőképpen eredeti hangokkal történő összevetéssel. Amennyiben a jelenleg figyelembe vett síphang-jellemzők nem adnak elég jó közelítést, akkor pontosítani kell egyrészt az analízist, másrészt a modell struktúráját. A bevezetett jelmodell a jelenlegi fázisában ugyanis nem foglalkozik például azzal, hogy a nyitott sípok mindkét végükön sugároznak, és ugyancsak figyelmen kívül hagyja a síp környezetének hatásait is.

Továbbfejlesztésként megemlítem, hogy a jelmodell-alapú szintézis más hangszerekre történő adaptálása is érdekes kísérlet lehet. Természetesen egy ilyen megvalósításhoz az adott hangszernél az analízis vizsgálatot legalább ugyanilyen mélységben el kell végezni. Van azonban néhány olyan érv, ami érzékeltetheti, hogy a legtöbb hangszerre jóval bonyolultabb vezérlést kell megvalósítani, mint amelyet az orgonánál első közelítésben alkalmaztunk. Egyrészt azoknál a hangszereknél, ahol a folyamatos gerjesztés emberi beavatkozással szabályozott (pl. hegedű), a paraméterek nem tekinthetők időinvariánsnak. Impulzusgerjesztésű hangszereknél (pl. gitár) a rendszer jobban közelíthető fix paraméterkészlettel.

Egy másik probléma — amely mindkét típusú hangszernél fellép — pedig az, hogy a szabályozható gerjesztésű hangszereknél a paraméterek változnak a hangerő, illetve a gerjesztés egyéb paramétereinek függvényében, akár szélsőségesen is (nemlineáris viselkedés). A dolgozatban láthattuk, hogy az orgonánál mindkét hatás elhanyagolható (a modellezés első szintjén), míg más hangszereknél pontosan ezek a jelenségek határozzák meg a keletkező hang jellegzetességeit.

Ha a jelmodell-alapú szintézis orgonára sikerrel jár, akkor — az imént említett problémák figyelembevételével — mindenképpen érdemes kísérletezni a modell más hangszerekre történő adaptálásával is.

Irodalomjegyzék

Könyvek:

Albert P., *Die elektronische Synthese von Orgeltönen* Verlag Erwin Bochinsky (Das Musikinstrument), Frankfurt am M. 1986.

Douglas A., *The electronic musical instrument manual* Pitman, London 1968.

Ellenhorst W., *Handbuch der Orgelkunde I-II*. Frits Knuf, Buren 1975.

Fletcher N. H. - Rossing T. D., *The physics of musical instruments 16, 17. fejezet* Springer-Verlag, New York 1991.

Klotz H., *Az orgonáról* Zeneműkiadó, Budapest 1972.

Kruza R. - Banay G., *A szintetizátor a zenei gyakorlatban* Zeneműkiadó, Budapest 1985.

Pécsi S., *Az orgona* Zeneműkiadó, Budapest 1965.

Sík Z. - Gerényi G., *MIDI alapozás, MIDI protokoll* Pixel Graphics Kft., Budapest 1992.

Tarnóczy T., *Zenei akusztika* (49-55, 323-356 o.) Zeneműkiadó, Budapest 1982.

Disszertációk, diplomatervek:

Angster J., *Orgona ajaksípok megszólalásának és rezgésének korszerű mérési módszerei és eredményei* kandidátusi értekezés, MTA MMSz Akusztikai Kutatólaboratóriuma, Budapest 1990.

Fürjes A., *Nyílt struktúrájú zenei hangszintézis digitális jelfeldolgozó processzorral* diplomaterv feladat, BME Elméleti Villamosság-tanszék, Budapest 1995/96 II. félév

Koller I., *A Wigner-eloszlás és alkalmazása hangszugárzók mérés technikájában* Egyetemi doktori értekezés, BME Híradástechnika tanszék, Budapest, 1991.

Skordos-P.A., *Modeling Flue Pipes: Subsonic Flow, Lattice Boltzmann, and Parallel Distributed Computers*. Technical rept. Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, 1995.

Verge M-P., *Aeroacoustics of confined jets* Thesis Technische Universiteit Eindhoven, 1995.

Cikkek, folyóiratok, konferenciakiadványok

Albert P., *Az elektronikus orgonák korszerű áramkörei I-XXVIII*. Rádiótechnika, 1976-78.

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.

Angster J. - Miklós A., *Coupling Between Simultaneously Sounded Organ Pipes* AES Preprint 3534 (F1-2), különnyomat a 94. berlini konferencián elhangzott előadás nyomán, Berlin 1993

Angster J. - Miklós A., *Documentation of the sound of a historical pipe organ* Applied Acoustics **46** (1995) 61-82. o.

Jánosy Z. - Välimäki V., *Fizikai modell alapú digitális hangszintézis* Híradástechnika, 1992. február, 21-24. o.

Péceli G., *A common structure for recursive discrete transforms* IEEE Transactions on Circuits and Systems CAS-33. kötet, 1035-36. o., 1986.

Smith J. O., *Digital Waveguide Modeling of Musical Instruments* CCRMA, Stanford, DRAFT 7/24/93

Välimäki V. - Karjalainen M. - Jánosy Z. - Laine U. K., *A real-time implementation of a flute model*, Proc. IEEE ICASSP'92, San Francisco 1992.

Egyéb források:

Horváthné Gembinczky E., *Műszaki akusztika* előadássorozat, BME Híradástechnikai Tanszék, 1997/98 I. félév

Takács F., *Stúdiótechnika* előadássorozat, BME Híradástechnikai Tanszék, 1998/99 I. félév

Internet:

Ahlborn profile <http://www.generalmusic.com/company/profile/ahlborn.htm>

Hammond A100 Manual <http://www.theatreorgans.com/hammond/faq/A100.html>

Hammond FAQ site [http://www.theatreorgans.com/hammond/faq/...](http://www.theatreorgans.com/hammond/faq/)

Hammond Mailing List hammond@home.ease.lsoft.com

Rodgers features <http://www.rodgerscorp.com/features/pdi.html>

Digitális orgonákkal foglalkozó cégek honlapjai:

Ahlborn orgelbau [http://www.generalmusic.com/ahlborn/...](http://www.generalmusic.com/ahlborn/)

Allen organs [http://www.allenorgan.com/...](http://www.allenorgan.com/)

Baldwin organs <http://www.bright.net/~cos/page4.html>

Johannus orgelbouw [http://www.johannus.com/...](http://www.johannus.com/)

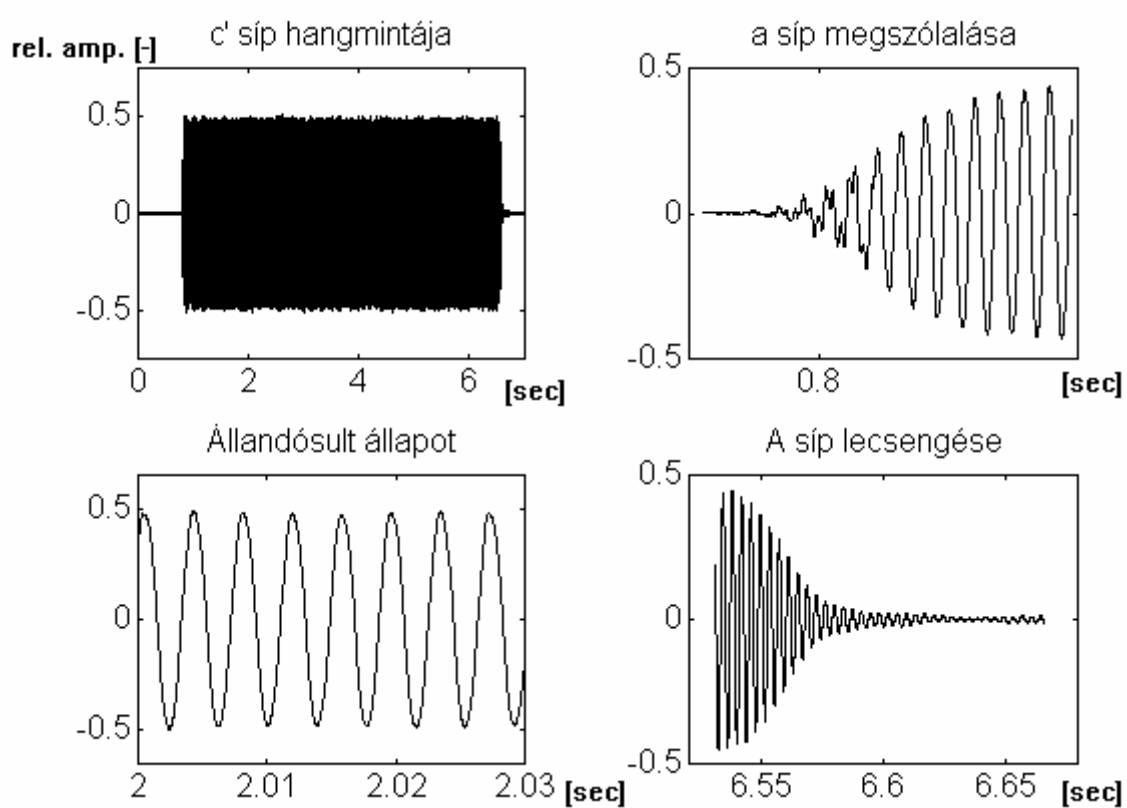
Makin organs [http://www.makinorgans.co.uk/...](http://www.makinorgans.co.uk/)

Prestige organs <http://www.churchorgansystems.com/prestige.html>

Rodgers organs [http://www.rodgerscorp.com/...](http://www.rodgerscorp.com/)

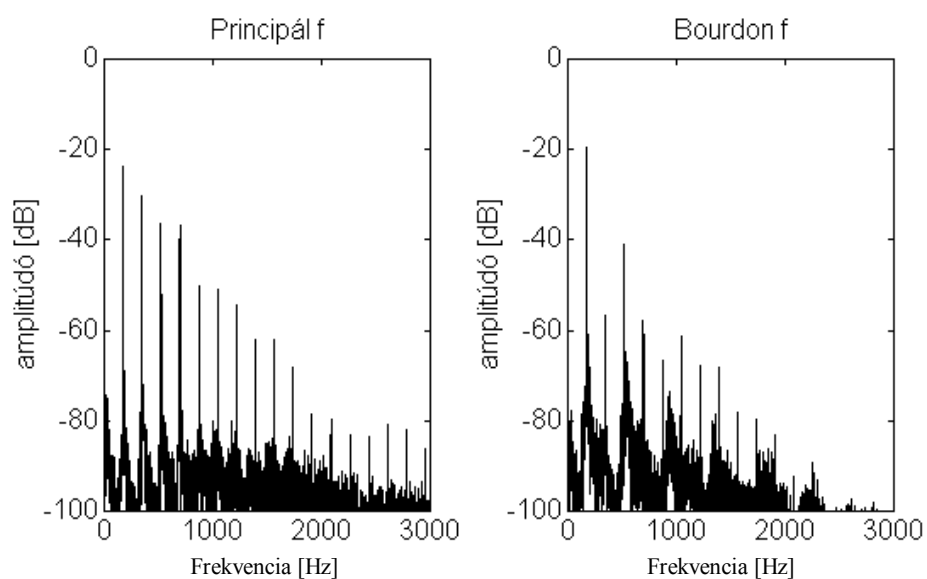
Viscount organs [http://viscount.co.nz/...](http://viscount.co.nz/)

Melléklet

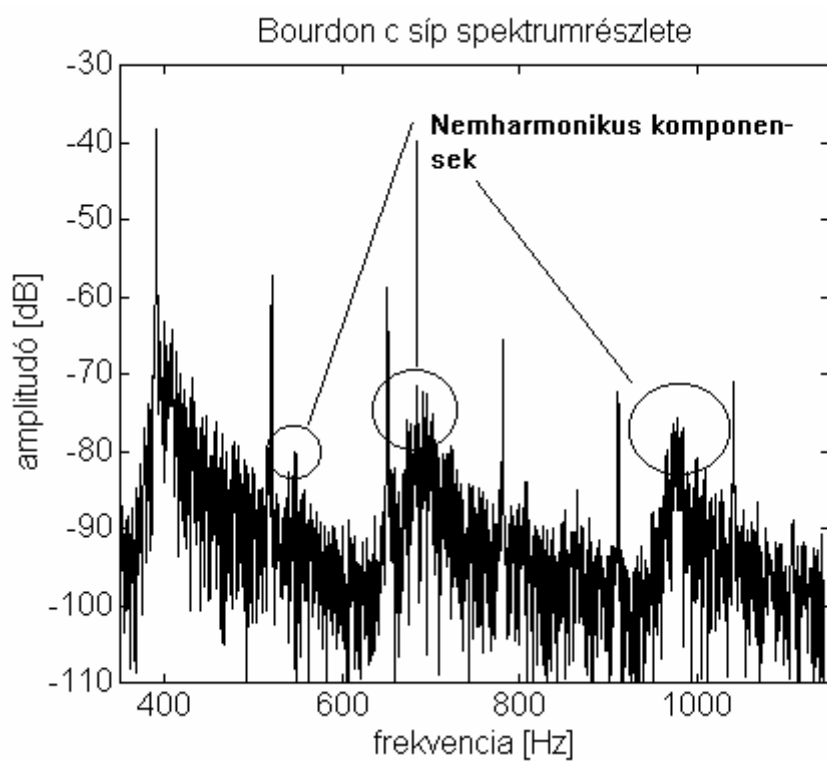


M.1. ábra Bourdon regiszter c' súpjának mérése

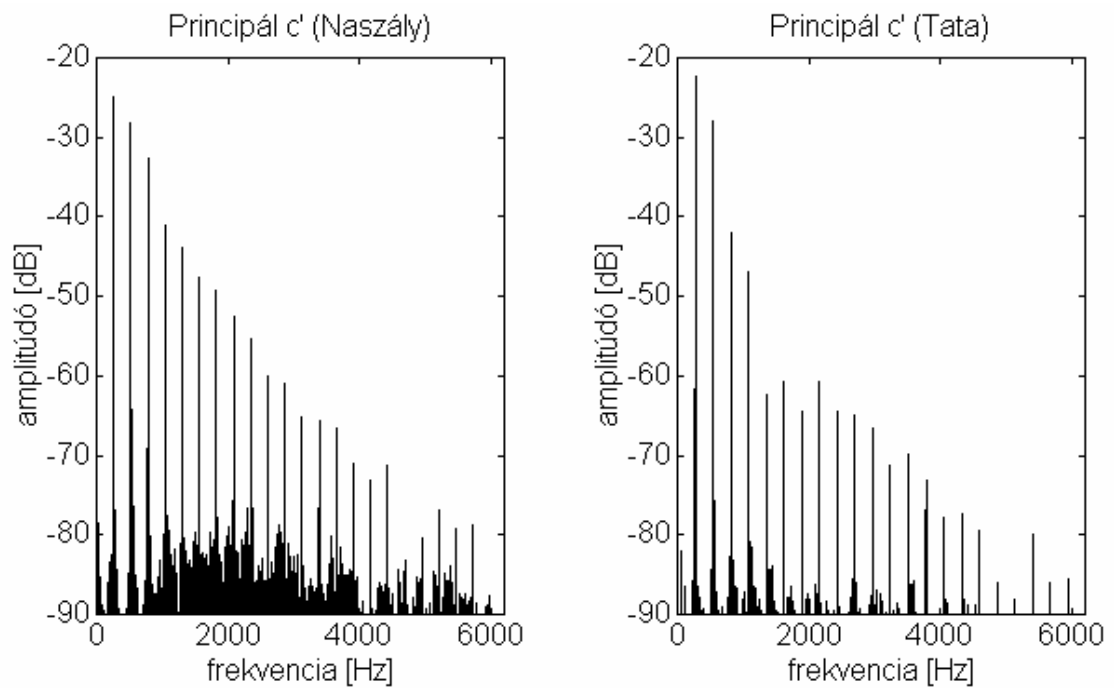
M.1. Állandósult spektrum



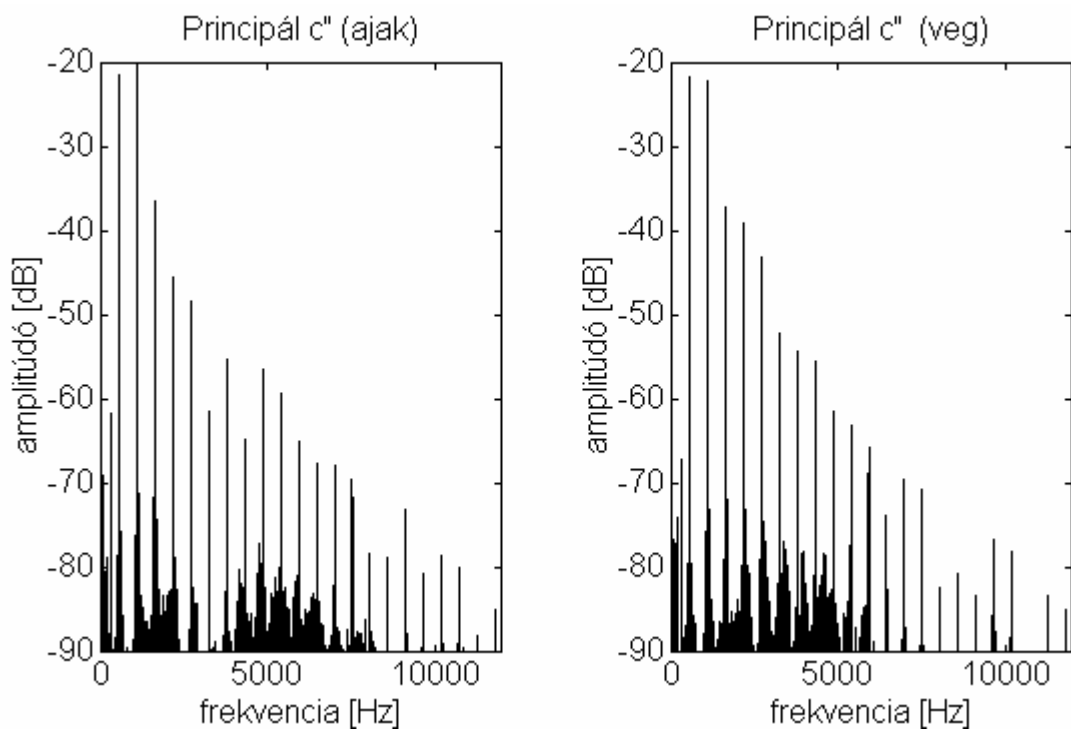
M.1.1. ábra Principál és Bourdon regiszter spektrumának összehasonlítása



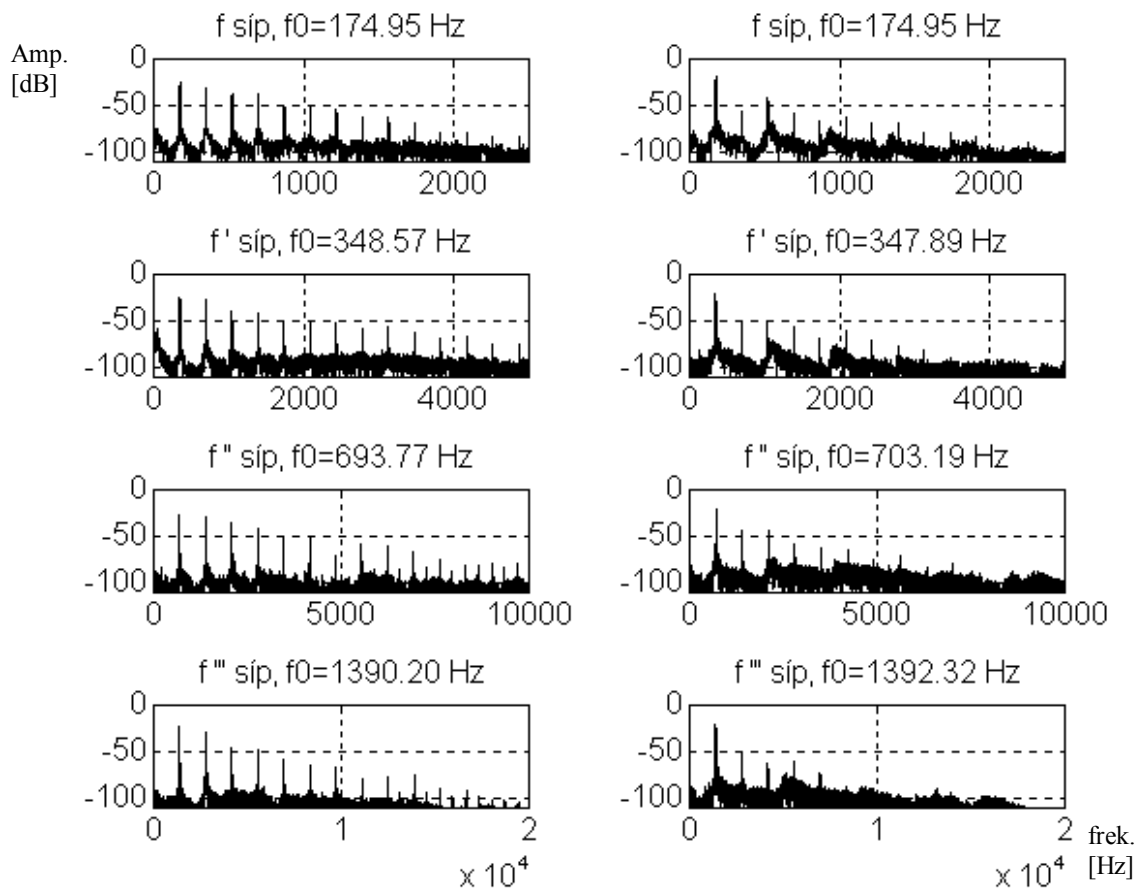
M.1.2. ábra Bourdon síp spektrumának kinagyított részlete



M.1.3. ábra Két (azonos névleges frekvenciájú) Principál síp spektruma

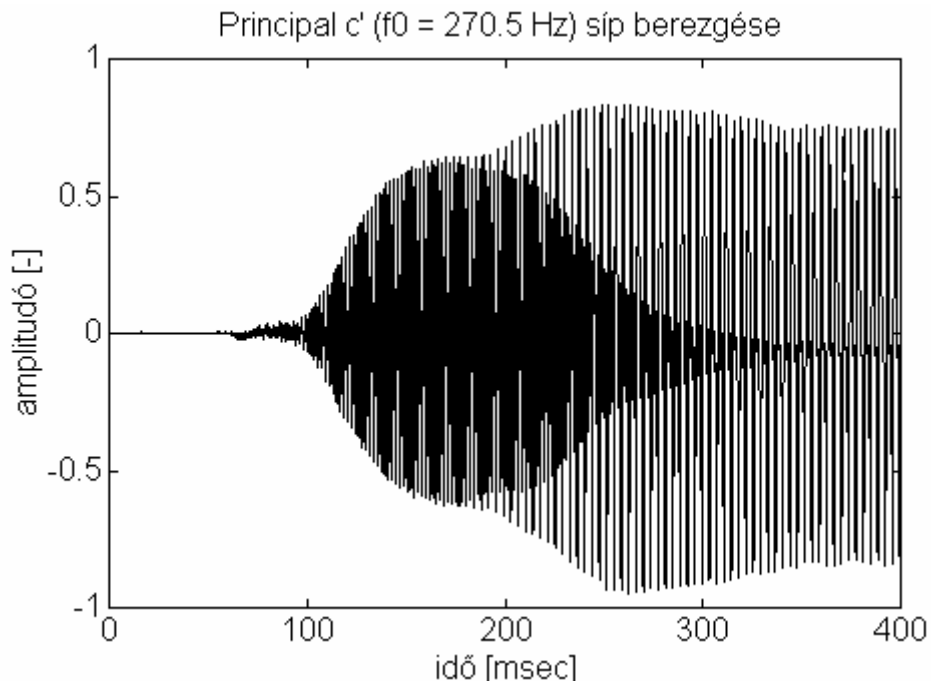


M.1.4. ábra Egy nyitott síp két sugárzó nyílásának spektruma

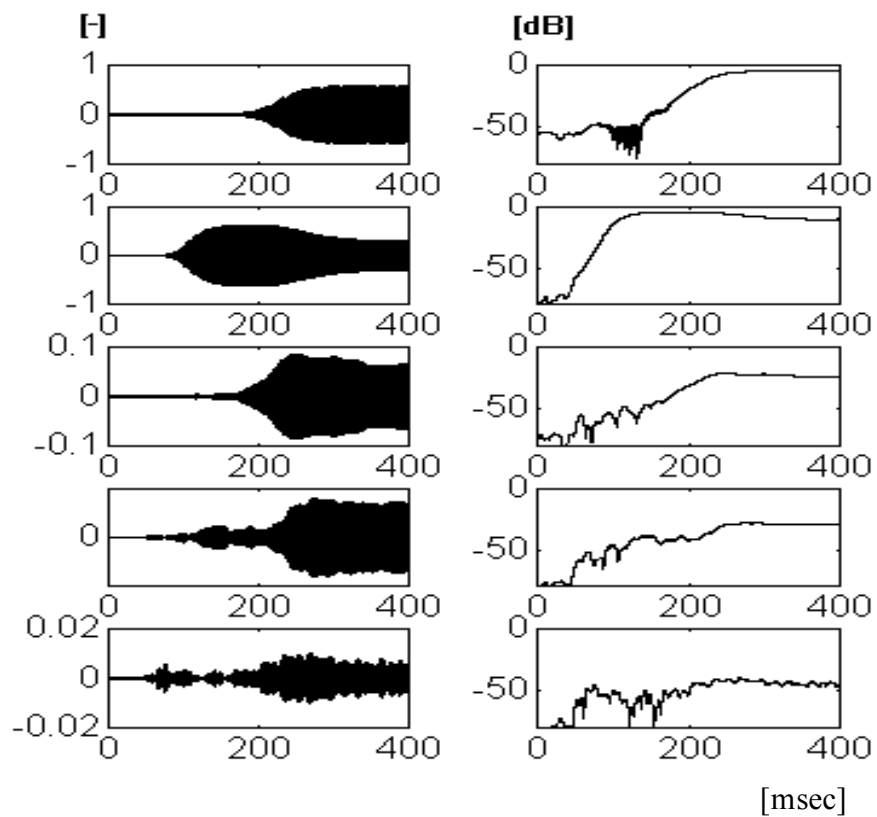


M.1.5-6. ábra A Principál és a Bourdon regiszterek felhangstruktúrájának változása az alulfrekvencia függvényében

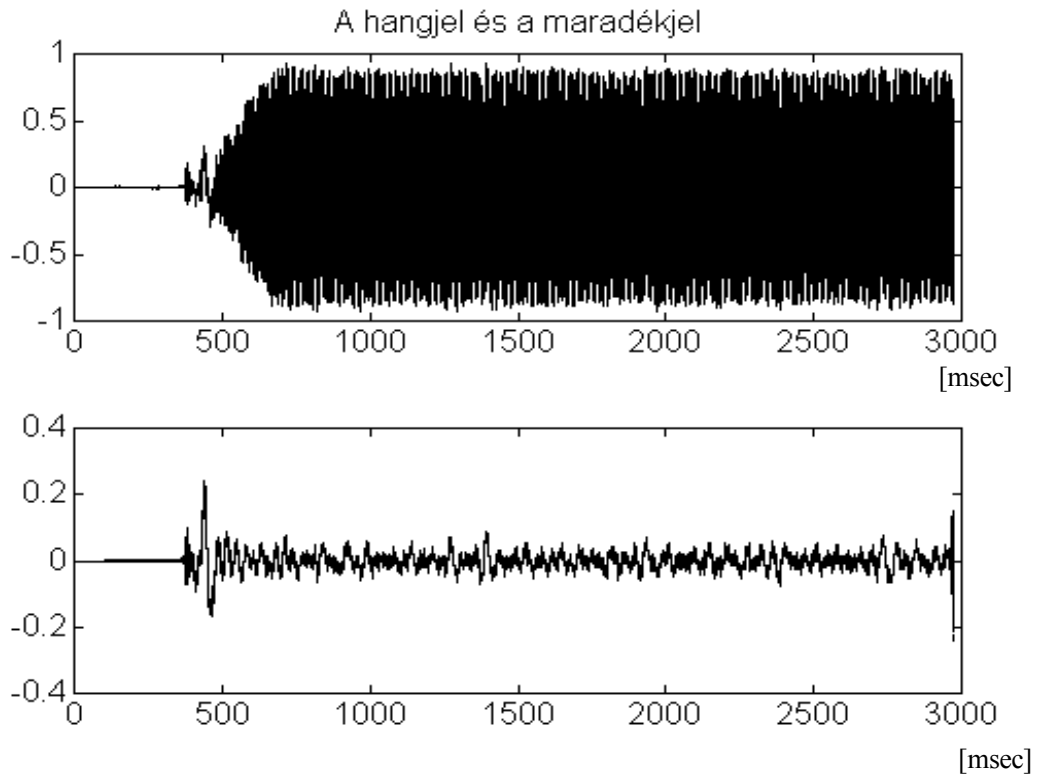
M.2. Tranziens jelenségek



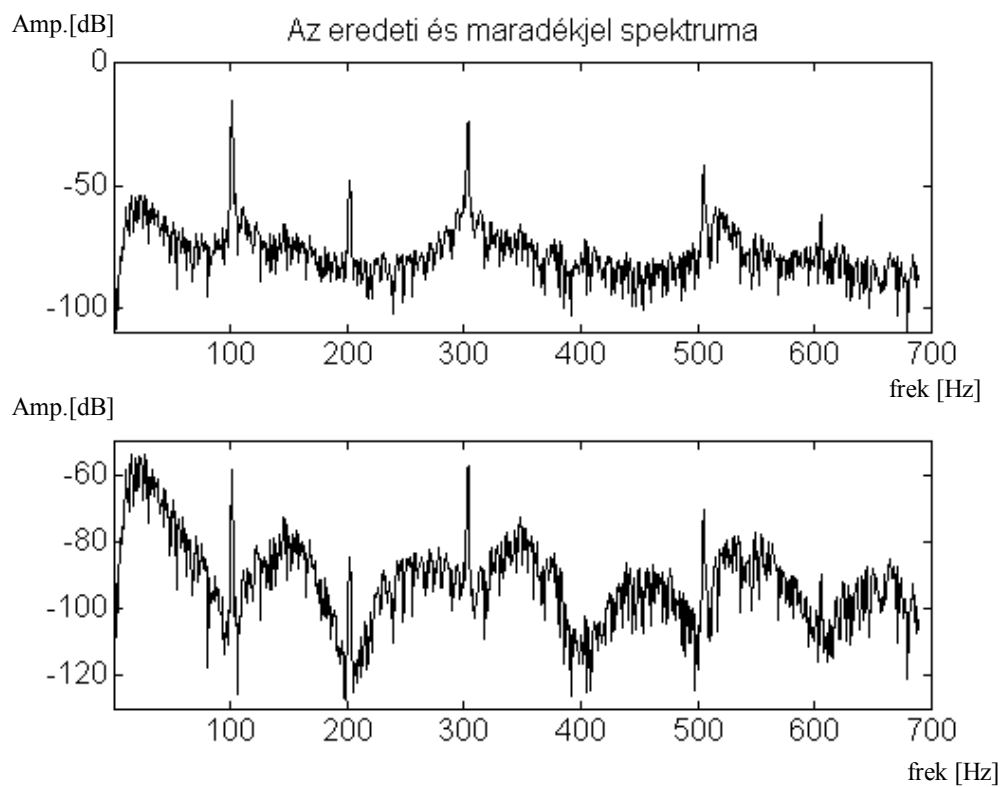
M.2.1. ábra Principál c' síp megszólalása időtartományban



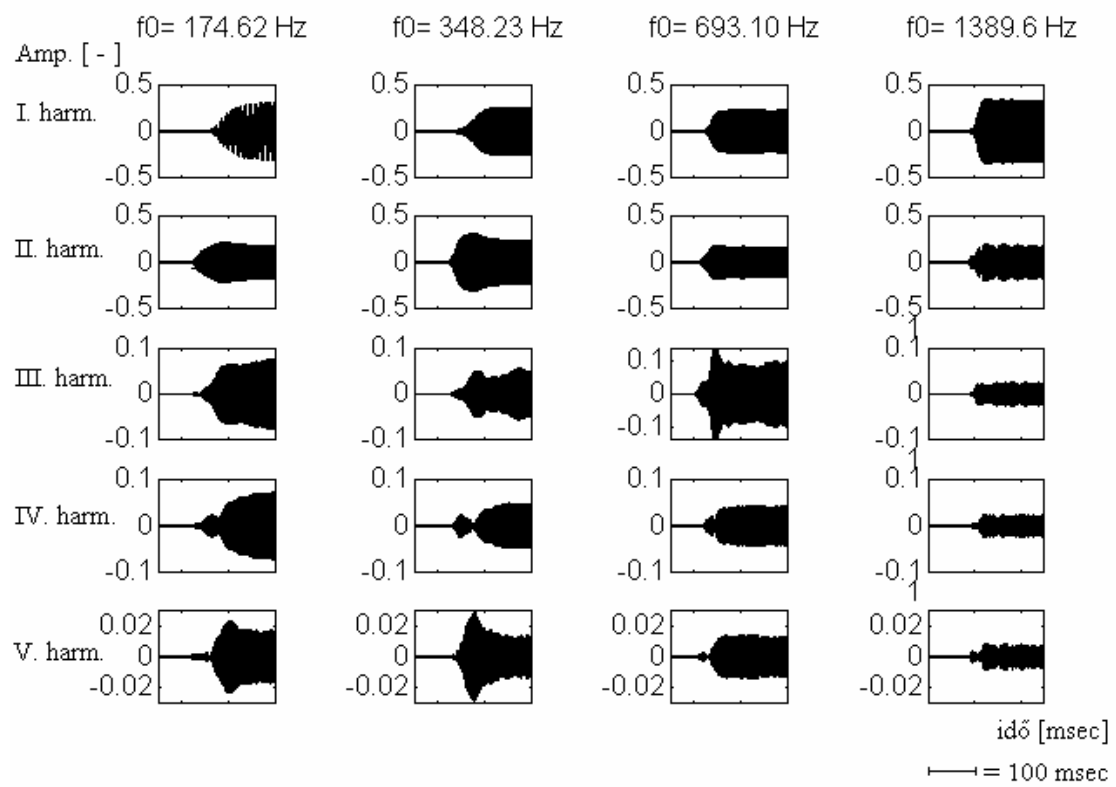
M.2.2. ábra Principál c' síp első öt felharmonikusának tranziensei



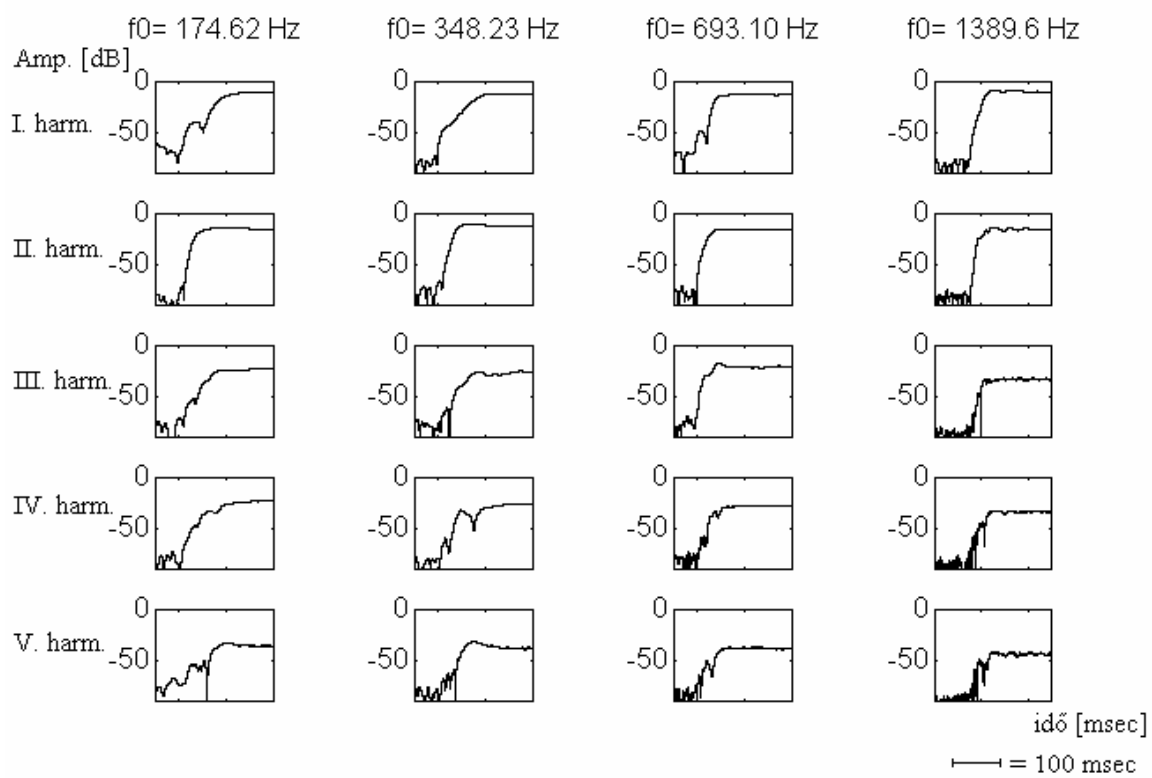
M.2.3. ábra Egy síp eredeti és „maradék” jele



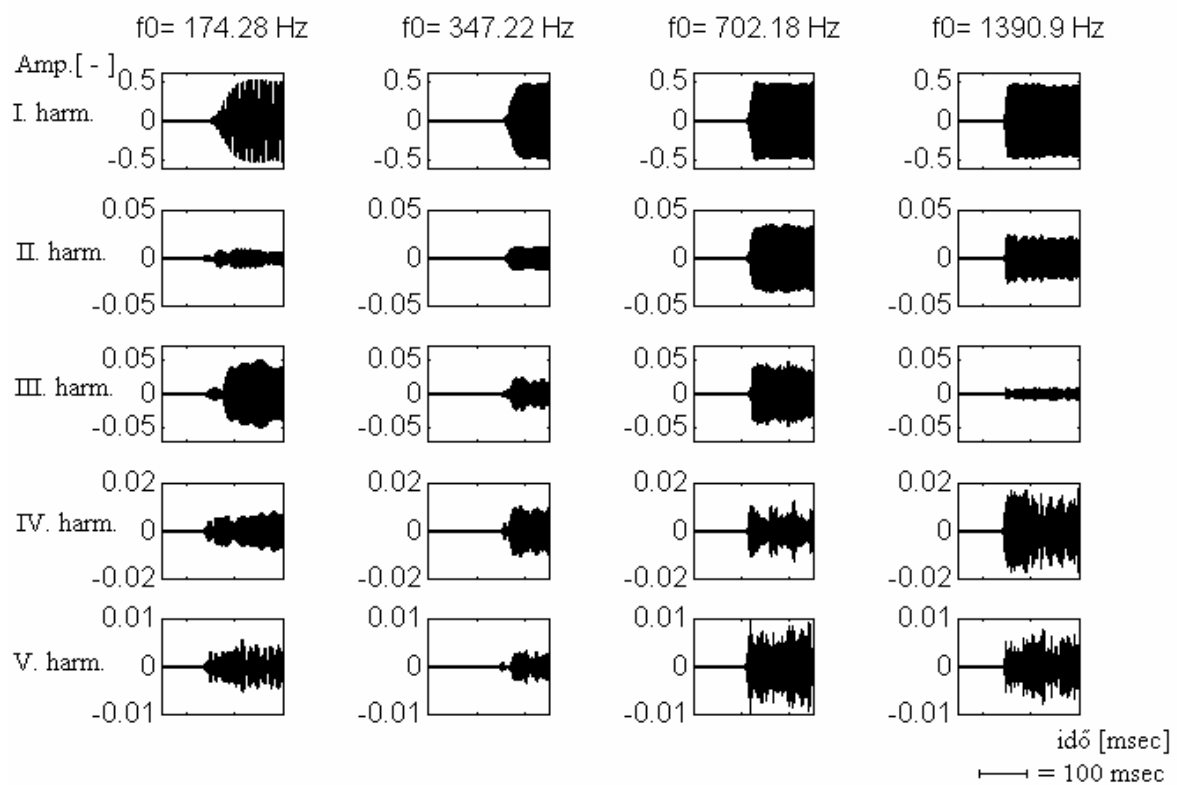
M.2.4. ábra Egy síp eredeti és „maradék” jelének spektruma



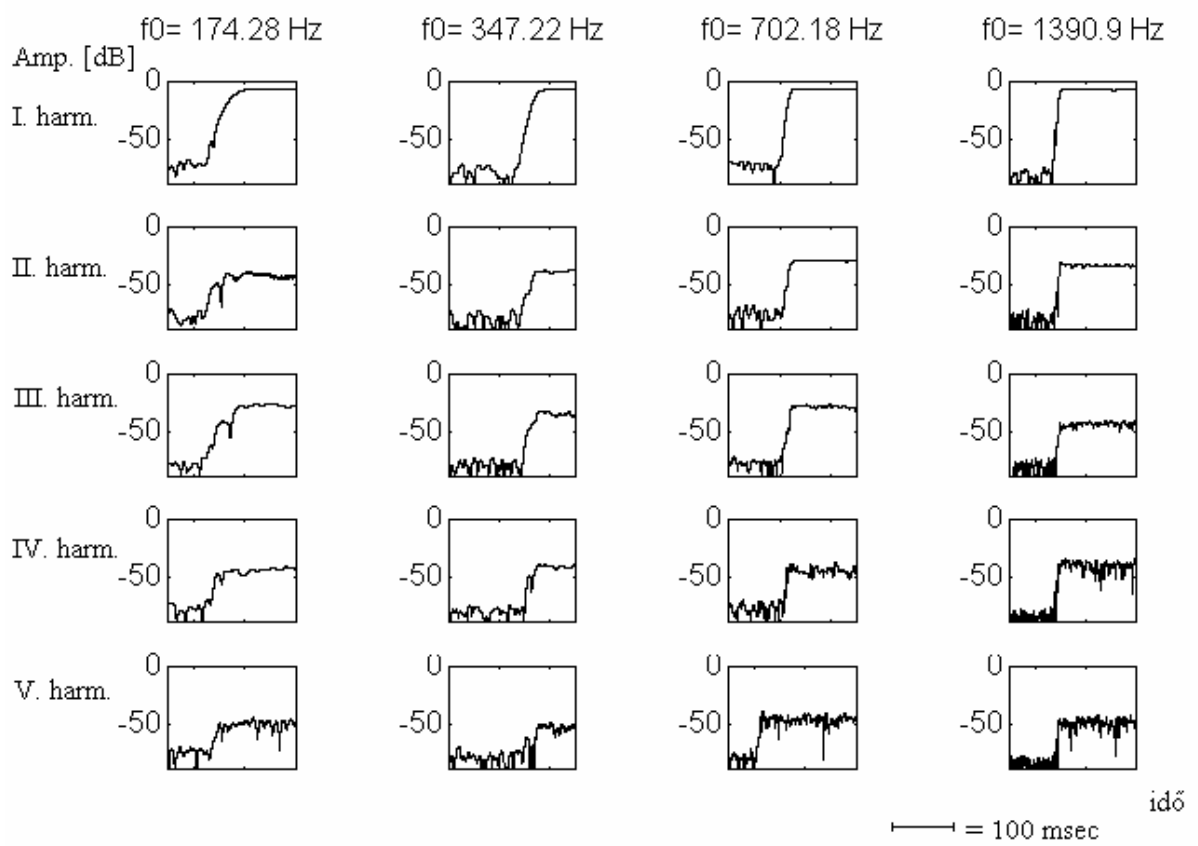
M.2.5. ábra Principál regiszter berezgési folyamatainak változása - lineáris amplitúdóskála



M.2.6. ábra Principál regiszter berezgési folyamatainak változása - logaritmikus amplitúdóskála

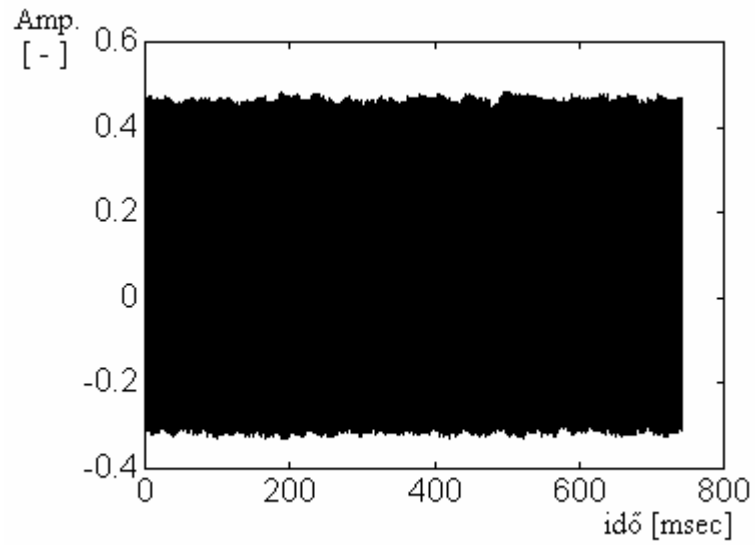


M.2.7. ábra Bourdon regiszter berezgési folyamatainak változása - lineáris amplitúdóskála

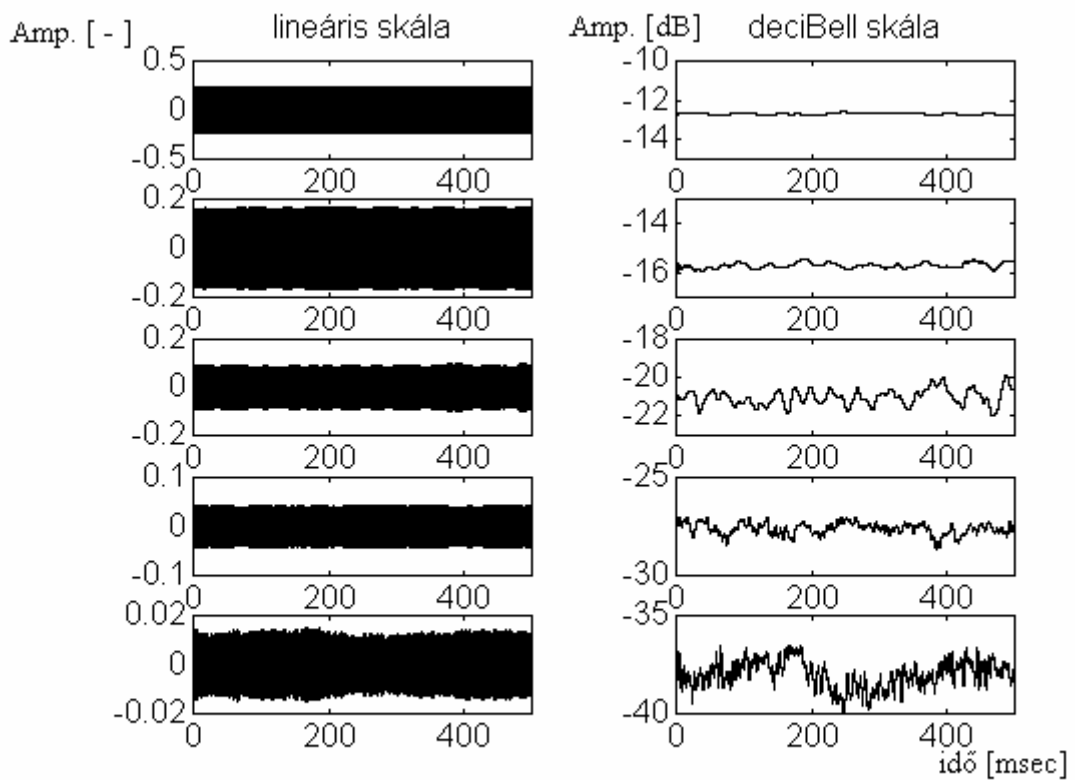


M.2.8. ábra Bourdon regiszter berezgési folyamatainak változása - logaritmikus amplitúdóskála

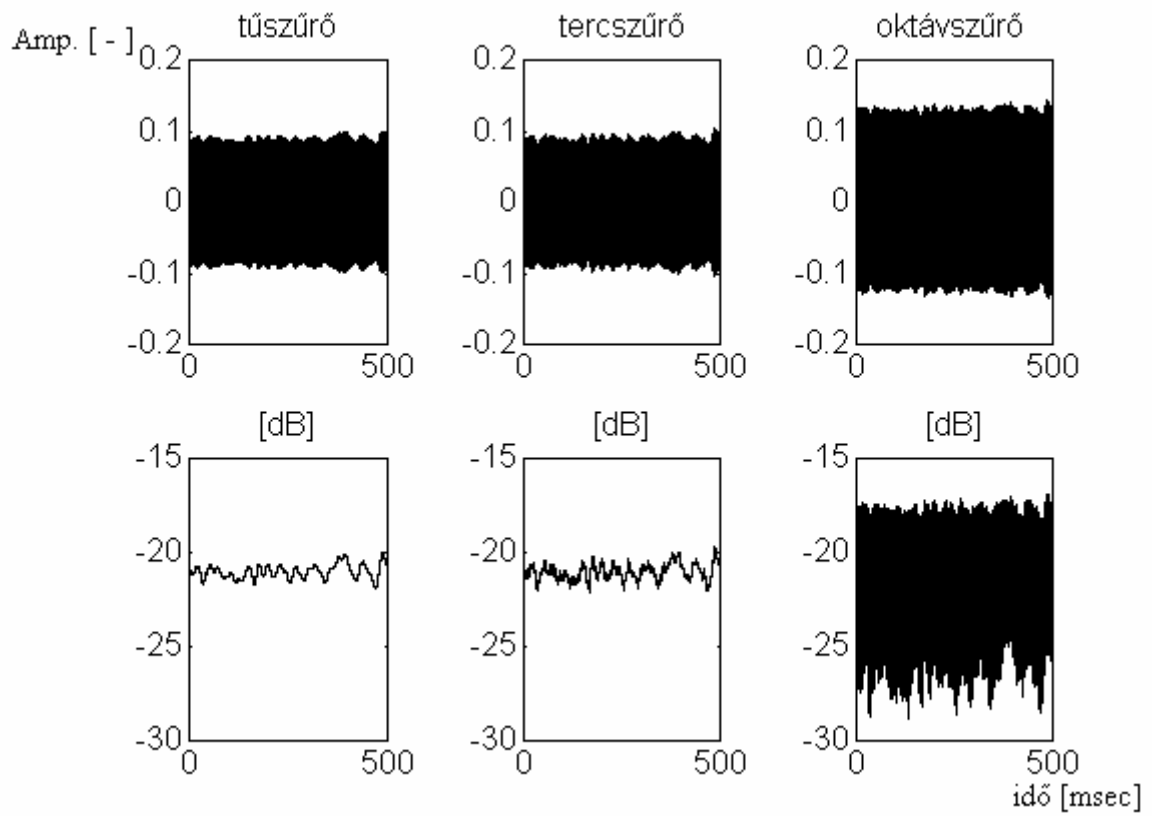
M.3. Véletleningadozások



M.3.1. ábra Állandósult állapotban lévő síp amplitúdó-burkolójának ingadozása



M.3.2. ábra Állandósult állapotban lévő síp felharmonikusainak amplitúdó-ingadozása



M.3.3. ábra Különböző szűrőkkel kiszűrt felharmonikus amplitúdó-ingadozása