

Tartalom

<u>Tartalom</u>	1
<u>1. Bevezetés</u>	3
<u>2. Hangszintézis-technikák összefoglalása az elektromos gitár szempontjából</u>	4
<u>2.1 Additív szintézis</u>	4
<u>2.2 Szubtraktív szintézis</u>	4
<u>2.3 FM szintézis</u>	5
<u>2.4 Wavetable szintézis</u>	5
<u>2.5 Fizikai modellezés</u>	5
<u>2.5.1 Hibrid szintézis</u>	7
<u>2.6 Összefoglalás</u>	7
<u>3. Az elektromos gitár</u>	8
<u>3.1 Az elektromos gitár felépítése</u>	8
<u>3.2 Az elektromos gitár működése</u>	9
<u>3.2.1 A húr</u>	9
<u>3.2.2 Az elektromos gitár teste</u>	12
<u>3.2.3 A pickup</u>	12
<u>3.3 Az elektromos gitár hangjai</u>	15
<u>4. A gitár húrjának modellezése</u>	16
<u>4.1 A Karplus-Strong algoritmus</u>	16
<u>4.2 A digitális waveguide struktúra</u>	17
<u>4.2.1 A bővített waveguide</u>	19
<u>4.3 A húr hangolása</u>	19
<u>4.4 A veszteségi szűrő</u>	21
<u>4.4.1 A paraméterek meghatározása méréssel</u>	22
<u>4.4.1.1 A lecsengési idő meghatározása</u>	22
<u>4.4.1.2 A veszteségi szűrő átviteli függvényének meghatározása</u>	24
<u>5. A gerjesztés modellezése</u>	25
<u>5.1 A gerjesztés alapegyenletei</u>	26
<u>5.1.1 A gerjesztő test mechanikai modellje</u>	27
<u>5.1.2 A húr gerjesztése</u>	28

<u>5.2 A gerjesztés paramétereinek beállítása</u>	30
<u>5.2.1 A gerjesztés felfutási szakasza</u>	32
<u>5.2.2 A gerjesztés elengedési szakasza</u>	33
<u>5.2.3 A húr tompítása</u>	33
<u>6. A pickup modellezése</u> 36	
<u>6.1 A pickup fizikája</u>	36
<u>6.2 A pickup mérése</u>	39
<u>6.2.1 Az első mérési elrendezés</u>	40
<u>6.2.2 A második mérési elrendezés</u>	41
<u>6.3 A pickup beillesztése a modellbe</u>	43
<u>6.3.1 A mérés eredménye</u>	44
<u>6.3.1.1 A pickup deriváló hatása</u>	44
<u>6.1.1.1 A pickup nemlinearitása</u>	45
<u>6.3.2 Megvalósítás, és a szükséges egyszerűsítések</u>	48
<u>7. A valós idejű szintézis</u> 51	
<u>7.1 A megvalósítás eszköze</u>	51
<u>7.2 A megvalósított modell</u>	52
<u>7.2.1 A húr és a gerjesztés megvalósítása</u>	53
<u>7.2.2 A pickup megvalósítása</u>	54
<u>7.2.3 A megvalósított modell vezérlése, dallamjátszás</u>	55
<u>7.2.4 Eredmények</u>	57
<u>8. Értékelés, továbbfejlesztési lehetőségek</u> 58	
<u>Függelék</u> 60	
<u>1. A mérésekhez használt műszerek</u>	60
<u>1.1 A húr mérése</u>	60
<u>1.2 A pickup mérése</u>	60
<u>2. A húr mérésének eredményei</u>	62
<u>3. A pickup mérésének eredményei</u>	67
<u>Irodalomjegyzék</u> 71	
<u>Ábrajegyzék</u> 72	
<u>Melléklet</u> 75	

1. Bevezetés

Az elektromos gitár napjainkban a legelterjedtebb hangszerek egyike, használják a könnyűzene majd minden irányzatában, a jazz-ben és néha-néha már feltűnik a komolyzenében is. Éppen ezért az elektromos gitár hangja manapság már nem hiányozhat az elektronikus zenék művelőinek eszközkészletéből sem. A manapság elterjedt szintetizátorok az akusztikus és elektroakusztikus hangszerek hangját többnyire wavetable szintézissel valósítják meg. A wavetable szintézisnek rengeteg előnye mellett hátránya, hogy a megszólaltatandó hangszer hangjait rögzített mintakészletből olvassa ki, így a hangszer hangjának rugalmas vezérlése (különböző játéktechnikák) nem megoldott. Jogos az igény egy olyan szintézis megvalósítására, amely megvalósítja a hangszer hangjának rugalmas vezérelhetőségét, miközben a hangszer hangja is valóságos marad.

Az utóbbi egy-két évtizedben alakult ki egy új típusú szintézis, a fizikai modell alapú szintézis. A leglényegesebb különbség a fizikai modell alapú szintézis, és a többi szintézis között, hogy míg a régebbi szintézisek a hangszer hangját, addig a fizikai modell alapú szintézis a hangkeltés módját modellezi. A fizikai modell alapú szintézis alapja, hogy a hangszer fizikai működéséből kiindulva megalkossunk egy olyan modellt, amely a hangszert meghatározó jelenségeket tudja szimulálni. Ugyanakkor a hangszert meghatározó mechanizmusok ismerete és figyelembevétele csak olyan szinten szükséges, amivel a hangszer működését már kellőképpen le tudjuk írni.

Az elektromos gitár – és más húros hangszerek – fizikai modell alapú szintézisére a waveguide modell egy elterjedt megoldás. A diplomaterv célja a gitár egy waveguide alapú modelljének megalkotása és megvalósítása. A modell megalkotása során a paraméterek beállításához méréseket kell majd végezni. A modell működtetéséhez, pedig egy, a valóságot jól közelítő gerjesztésmodell megalkotása lesz szükséges.

2. Hangszintézis-technikák összefoglalása az elektromos gitár szempontjából

Az utóbbi néhány évtizedben többféle szintézismódszer alakult ki és terjedt el a különböző elektronikus hangszerekben, szintetizátorokban. Mindegyiknek megvannak az előnyei és a hátrányai, ezért nem lett egyik módszer sem univerzális. Ebben a fejezetben azt fogjuk megvizsgálni, hogy az elektromos gitár valós idejű szintézisének szempontjából melyik elterjedt szintézis-technika felel meg leginkább elvárásainknak.

2.1 Additív szintézis

Az additív vagy Fourier-szintézis kiindulópontja, hogy a periodikus jelek Fourier-sorba fejthetők, azaz felbonthatóak egy f_0 alaphérvenciájú és több, ettől különböző hérvenciájú szinuszhullám összegére. A szintézis során a szintetizálni kívánt hang spektrumának fő komponenseit eltároljuk. A szintetizált hang úgy keletkezik, hogy az eltárolt komponenseknek megfelelő hérvenciájú és amplitúdójú szinuszhullámokat generálunk, és ezeket összegezzük. Az élőbb megszólalás érdekében ADSR (Attack, Delay, Sustain, Release) burkolót illesztünk a hangra [Fürjes1996].

Ez a technika az elektromos gitár hangjának állandósult állapotának szintézisére jól alkalmazható, de a kezdeti szakaszt megengedhetetlenül leegyszerűsíti. Ezenkívül az additív szintézis nem teszi lehetővé a szabad és rugalmas paraméterezhetőséget, ami a különböző pengetési és játéktechnikák megvalósításához elengedhetetlen.

2.2 Szubtraktív szintézis

A szubtraktív szintézis lényege, hogy a rendszer bemenete egy gazdag spektrumú periodikus jel (négyzetjel, fűrészel) vagy szélessávú zaj. Ebből a bementből szűréssel (alul-, felül-áteresztő, sávzáró, sáváteresztő és lyukszűrőkkel) nyerjük ki a számunkra lényeges hérvenciakomponenseket [Fürjes1996].

Az elektromos gitár szempontjából ennek a módszernek ismét hatalmas hátránya, hogy a hang indulási szakasza nem, vagy csak nagyon nehezen reprodukálható, a valós

megszólalásnak megfelelő paraméterezés is lehetetlen, és a különböző felharmonikusok különböző lecsengési ideje is nehezen csak megvalósítható lenne.

2.3 FM szintézis

FM szintézisnél a digitális oszcillátorokkal előállított jelalakok frekvenciáját moduláljuk, így frekvenciakomponenseink csak $f_c \pm kf_m$ frekvenciákon lesznek, ahol f_c a vivő és f_m a moduláló frekvencia. Komplexebb szintézis az oszcillátorok sorba és párhuzamosan kötéséből, visszacsatolásából és többszöri modulációból adódik [Bank-Nagy1999].

Ez a fajta szintézis sem alkalmas céljaink elérésére, mivel nincs kidolgozott módszer a hangszer hangja és a kialakítandó struktúra közötti kapcsolat felderítésének, ezért ezt csak hosszadalmas kísérletezéssel kaphatjuk meg. A kapott eredmény sem lenne kielégítő ismét a gitár hangjának indulási szakasza és a sokféle pengetési és játéktechnika miatt.

2.4 Wavetable szintézis

A szintézis alapja, hogy az eredeti akusztikus hangszer hangját eltároljuk, és később visszajátsszuk azt. Az eltárolandó hangok által elfoglalt adatterületet csökkenteni kell. Ezt úgy érjük el, hogy a hang kezdeti tranziens szakaszát és az állandósult állapot néhány periódusát tároljuk el, és ezt a néhány periódust ismételtetjük. A hangmagasságot meg bizonyos korlátok között gyorsabb-lassabb lejátszással érjük el [Fürjes1996].

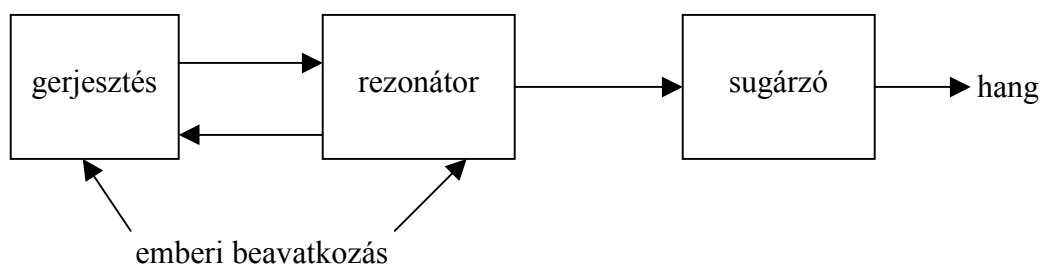
Az eddig ismertetett módszerek közül ezzel a technikával érhetjük el a legjobb, legélethűbb eredményt, de a keltett hangok szabad paraméterezhetősége itt sem adott, ezért a játéktechnikák száma itt is jelentősen korlátozott. Másrészt a transzponálás miatt a végeredmény minősége is rosszabb lehet a vártnál.

2.5 Fizikai modellezés

A leglényegesebb különbség az idáig tárgyalt szintézisek és a fizikai modellezés között, hogy míg az eddigiek a hangszer hangját próbálták utánozni, addig a fizikai

modellezés a hangkeltés módját. Ahhoz, hogy ez működőképes legyen, fel kell tételeznünk, hogy egy hangszer fizikai paraméterei és a hangja között egyértelmű kapcsolat van, és ugyanez a kapcsolat fennáll a fizikai modell és a hang között [Fürjes1996].

A modell felépítése során célszerű funkcionális blokkokra felbontani a hangszert az egyszerűbb megvalósíthatóság miatt. A hangszerek általános felbontása négy jól elkülöníthető egységből áll: a gerjesztésből, a rezonátorból, a sugárzóból és természetesen az emberi beavatkozásból (**2.1 ábra**). Gerjesztés lehet például egy pengetés, vagy egy vonó meghúzása. Rezonátor húros hangszereknél mindig a húr. A sugárzó akusztikus hangszereknél a hangszer teste.



2.1 ábra Általános hangszermodell

A szintézis által produkált hang minősége csak a felépített fizikai modell kidolgozottságától, és a modell valóságosságától függ. Mivel az így kapott rendszer bemenetei és kimenetei jól meghatározható fizikai paraméterek (erő, tömeg, sebesség, stb.), így a modell vezérlése jól kézbe tartható és könnyen átlátható. Mivel a modell a hangszer és megszólaltatásának tulajdonságai alapján készül, a hangoknak mind a kezdeti, tranziens szakaszában, mind az állandósult állapotában jól követi az eredeti hangszer hangját. A szintézis hátránya, hogy a modell paramétereinek meghatározása bonyolult feladat, melyre még nincs általános eljárás kidolgozva, és a hangszerek sokféle hangkeltő mechanizmusa miatt univerzális módszer csak nagy vonalakban dolgozható ki. Probléma ezenkívül még a fizikai modell nagy számításigénye is, amely egyszerű modell esetén nehezzé teszi a valós idejű megszólaltatást [Fürjes1996].

2.5.1 Hibrid szintézis

A fizikai modellezés bonyolultsága, és a modell nagy számításigénye miatt Vesa Välimäki és Matti Karjalainen kidolgoztak egy olyan akusztikus gitár-szintézist, mely a fizikai modellezés és a wavetable-szintézis keveréke [Karjalainen1995]. Ennek lényege, hogy a gitár testének és húrjainak fizikai modelljét táblázatban tárolt gerjesztésekkel gerjesztik. A tárolt gerjesztéseket úgy kapjuk, hogy a felvett hangot a test és a húr eredő szűrőjének inverzével szűrjük és a kapott eredmény első 1-2 ms-os részét tároljuk el táblázatban. Az így kapott hang valóságos, de ismét felveti azt a wavetable-szintézisnél tapasztalt problémát, hogy a modell nem vezérelhető rugalmasan, a játéktechnikának megfelelően.

2.6 Összefoglalás

A cél az elektromos gitár egy olyan valós idejű szintézise, melynek hangja valóságos, és a modell bemeneti, kimenetei és paraméterei az alkalmazott játéktechnikából, pengetési technikából és hangszerből átlátható módon levezethetők (pl.: ujj tömege, húrra ható erő, stb.). Erre a feladatra a fizikai modellen alapuló szintézis a legmegfelelőbb, bonyolultsága ellenére.

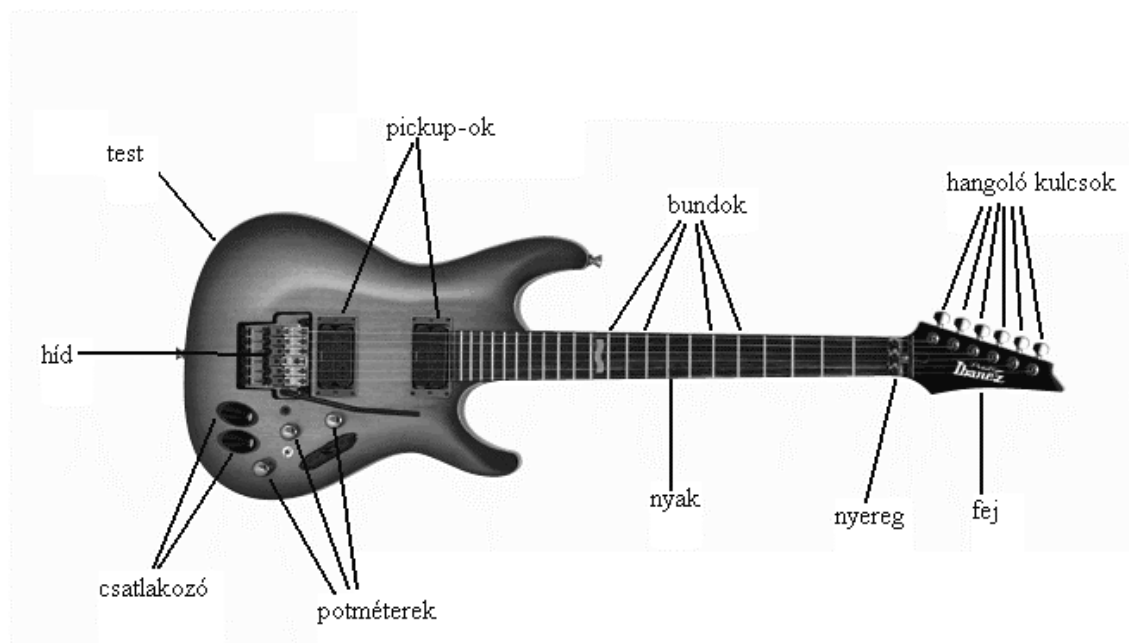
3. Az elektromos gitár

A hangszerek hangkeltés szempontjából három csoportra oszthatók: akusztikus (pl.: hegedű, trombita), elektroakusztikus és elektromos (pl.: szintetizátorok). Az elektromos gitár elektroakusztikus hangszer. Az elektroakusztikus hangszereknél a rezonátor valamilyen akusztikai forrás (elektromos gitár esetén a húr), viszont a hangot nem a hangszer teste sugározza, hanem a rezonátor által keltett rezgést valamilyen módon elektromos jellé alakítjuk. Az elektromos jelet felerősítve és hanggá alakítva hangszóróval sugározzuk az akusztikai közegbe.

Az elektromos gitár szintéziséhez elkerülhetetlen a hangszer megismerése, ezért ez a fejezet az elektromos gitár felépítéséről és működéséről fog szólni.

3.1 Az elektromos gitár felépítése

Rengetegféle formájú és márkájú elektromos gitár létezik, de alapvető építőelemeik mindnek ugyanazok (3.1 ábra).

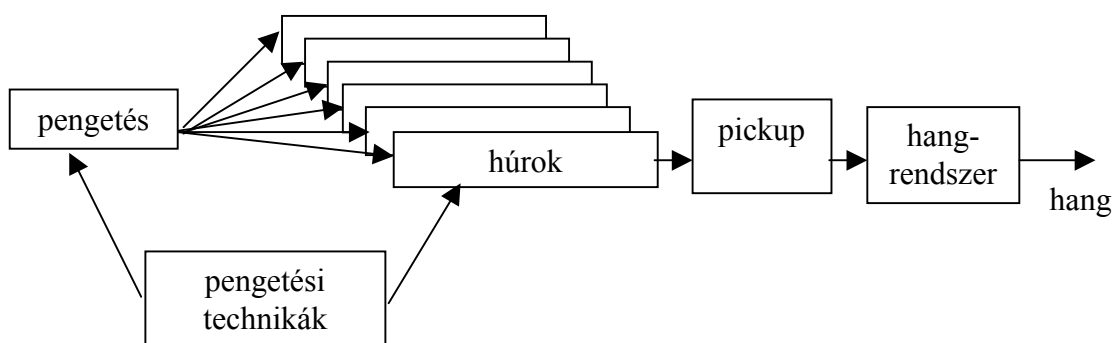


3.1 ábra Az elektromos gitár részei (Ibanez S2020X)

Az elektromos gitárnak általában hat húrja van, de van hét és tizenkét húros is. A hűrok lezárásai a híd és a nyereg. A hűrok alapfrekvenciáját a hangoló kulcsokkal állíthatjuk be. A gitár egyik legfontosabb része a nyak. A kényelmes játék, és a pontos megszólalás feltétele, hogy a gitár nyaka teljesen egyenes legyen, és a félhangonként elhelyezett bundok pontosan legyenek elhelyezve. A hűrok rezgéseit a pickup alakítja elektromos jellé, és innen különböző hangerő- és hangszínállítások (potméterek) után kerül a kimenetre.

3.2 Az elektromos gitár működése

Az elektromos gitár felbontható funkcionális egységekre, így a különböző egységek működését külön tárgyalhatjuk. A funkcionális egységeket összekapcsolva megkapjuk az elektromos gitár modelljét (3.2 ábra).



3.2 ábra Az elektromos gitár modellje

A zenész különböző pengetési technikákkal és a hűrok hosszának megváltoztatásával (a hűrt a megszólaltatni kívánt hangmagassághoz tartozó bundhoz szorítja) szólaltatja meg a hangszer. A hűrok rezgéseit a pickup alakítja elektromos jellé. Ezt a jelet egy audio erősítőn keresztül hangszórókhoz csatlakoztatjuk. Az alábbiakban az elektromos gitár főbb alkotó egységeinek működését fogjuk vizsgálni.

3.2.1 A húr

Az elektromos gitárnak általában hat különböző vastagságú, körülbelül 65 cm hosszú húrja van. A hűrok acélból, vagy annak valamilyen ötvözetéből készülnek. Kétféle

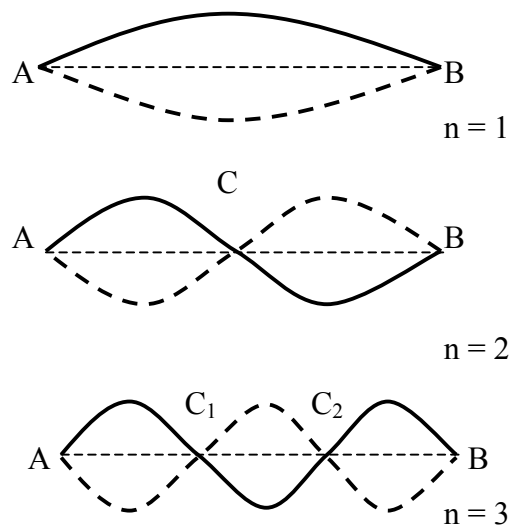
szerkezetű húr van egy húrkészletben. Amíg a három vékonyabb húr egy szimpla acélszálból áll, addig a vastagabb húrokon az acélszála még rá van tekerve egy másik szál is. A rátekerés szálra azért van szükség, hogy a húr vastagsága ellenére is megőrizze a könnyű megszólaltatáshoz szükséges rugalmasságát.

Ha a húr valamely pontján megzavarjuk az egyensúlyi állapotot, akkor az innen kiinduló és a húr lezárásairól visszaverődő hullámok interferenciájából álló hullámok keletkeznek, amelyekben a csomópontok kivételével a húr pontjai egyenlő vagy ellentétes fázisú rezgéseket végeznek.

A húrban gyakorlatilag csak a megnyújtás kelt rugalmas erőt, a hajlítás nem, ezért harántrezgéseket csak megfeszített állapotban tud végezni. Ekkor a húrban csak olyan állóhullámok alakulhatnak ki, amelyeknél a húr l hossza a λ_n hullámhossz felének egész számú többszöröse (3.1).

$$l = \frac{n\lambda_n}{2} \quad (n = 1, 2, \dots, n) \quad (3.1)$$

A húr két végét leszámítva a húron kialakuló csomópontok száma $n-1$ (3.3 ábra).



3.3 ábra A húrban kialakuló állóhullámok

A lehetséges sajátfrekvenciák értékei a

$$v_n = \frac{c}{\lambda_n} \quad (3.2)$$

képletből adódnak, ahol c a hullám terjedési sebessége. Ha (3.2)-be behelyettesítjük (3.1)-et és a terjedési sebességet kifejező

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (3.3)$$

képletet, ahol F a húrt feszítő erő és μ a húr hosszegységére eső tömeg, akkor a harántrezgéseket végző húr sajátfrekvenciáira a következő összefüggés adódik:

$$v_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = n v_1 \quad (3.4)$$

mivel $2l = \lambda_1$, az alapharmonikus hullámhossza [Budó1970]. Látható, hogy a felhangok (v_2, v_3, \dots) az alaphang frekvenciájának egész számú többszörösei, tehát a felhangok az alaphang felharmonikusai. Mint az a (3.4)-es képletből látszik, egy húr annál magasabb hangot ad, minél nagyobb a feszítő erő, minél rövidebb a húr és minél kisebb a húr egységnyi hosszára eső tömeg.

Ha a megpendített húrhoz a közepén hozzáérünk, az addig jól hallható alaphang eltűnik, viszont az oktávja (az első felharmonikus) jól hallható lesz. Ugyanezt a húr harmadánál megtéve a második felharmonikus lesz jól hallható (ezeket hívjuk üveghangnak). Ennek oka, hogy a húr közepét megérintve az itt duzzadóhellyel rendelkező alapharmonikust lecsillapítjuk, viszont az ugyanitt csomóponttal rendelkező első felharmonikust nem befolyásoltuk. Ebből következik, hogy egy megpendített húr alapharmonikusa és felharmonikusai is egyidejűleg megszólalnak. Ezek a felhangok szabják meg a húr hangjának színezetét, ami függ az alkalmazott pengetési technikától és a pengetés helyétől. Mivel, ha a húrt megpengetjük például a húr hatodánál, akkor az itt duzzadóhellyel rendelkező felhangok erőteljesebben szólalnak meg, viszont az ugyanitt csomóponttal rendelkező felhangok alig vagy egyáltalán nem fognak megszólalni [Budó1970].

A húr rossz hangsugárzó, mert kis levegőmennyiséget mozgat meg, ezenkívül a húr mozgásának következtében kialakuló hullámok ellentétes fázisúak, és az interferencia miatt gyengítik egymást [Budó1970]. Éppen ezért valamilyen módon a sugárzást

növelni kell. A sugárzást lehet növelni a húrhoz egy jól sugárzó test hozzáépítésével, vagy elektromos módon.

3.2.2 Az elektromos gitár teste

Az elektromos gitároknak általában tömör fából készül a teste, ezért a hang sugárzását a test nem tudja megoldani. Léteznek ugyan üreges testű elektromos gitárok is, de itt sem a hang sugárzása a cél. Mivel a test nem sugároz, a húrok testhez való rögzítése olyan módon van megoldva, hogy minél kevesebb energia jusson a húrból a testbe.

Tehát az elektromos gitár hangját nem a test sugározza, hatása azonban korántsem hanyagolható el. A gitár teste a húrt lezáró impedanciaként funkcionál, és ez az impedancia határozza meg az elektromos gitárra jellemző, az akusztikus gitárénál jóval hosszabb lecsengési időt. Ezenkívül a megszólaló hang spektrumát is jelentősen módosítja, gazdagítja. Fontos a test kialakítása, és a használt faanyag (pl.: habosított jávor). Általánosságban elmondható, hogy törekedni kell olyan konstrukciókra, melyek minél jobban színesítik a megszólaló hang spektrumát, illetve minél több rezonáns frekvenciájuk van, melyek mind a hangszer gazdagabb és élőbb megszólalását segítik elő.

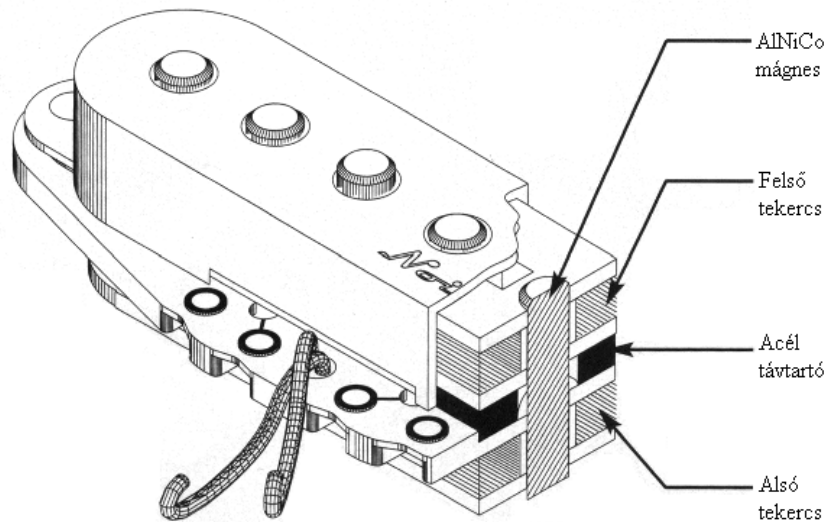
Az elektromos gitár szintézisének szempontjából a test spektrumszínesítő hatásával nem foglalkoztunk, mivel általános modellben gondolkodtunk, és ahhoz nem szükséges a test átvitelével foglalkozni. Az egyes gitárgyártók által készített különböző gitártestek a gitár egyénibb és szebb megszólalását szolgálják.

3.2.3 A pickup

Az elektromos gitárnál más utat kell keresnünk a megszólaltatott hang sugárzásra. Ebben az esetben a húrok rezgéseit elektromos jellé alakítjuk, amit erősítés után egy hangrendszerre kötünk. Az elektromos jellé alakítás eszköze a pickup.

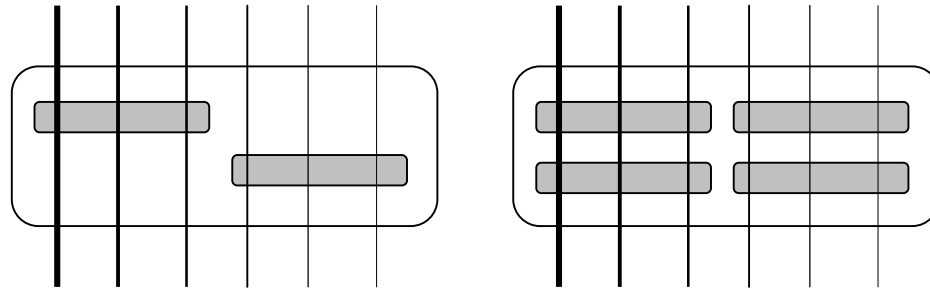
A pickup fő alkotóelemei egy tekercs és egy permanens mágnes. A mágnes terében elmozduló fémhúr megváltoztatja a mágneses tér fluxusát, így feszültséget indukál a tekercs meneteiben [Fodor1996]. A húr mozgása és az indukálódó feszültség kapcsolata nemlináris. A pickup működésének részletesebb taglalása a 6. fejezetben található.

A húr által gerjesztett elektromos jel alacsony jelszintje miatt a pickup-ok különlegesen érzékenyek az 50 Hz-es hálózati zajra. Ez a zaj a régebbi pickup típusoknál jól hallható. Ennek a zajnak a kiszűrésére lettek kifejlesztve az ún. „humbucker” pickup-ok (**3.4 ábra**). Ennek lényege, hogy két ellentétes irányú tekercset összekötnek, így a hálózati zaj nagyrészt el lesz nyomva [Turner1999].



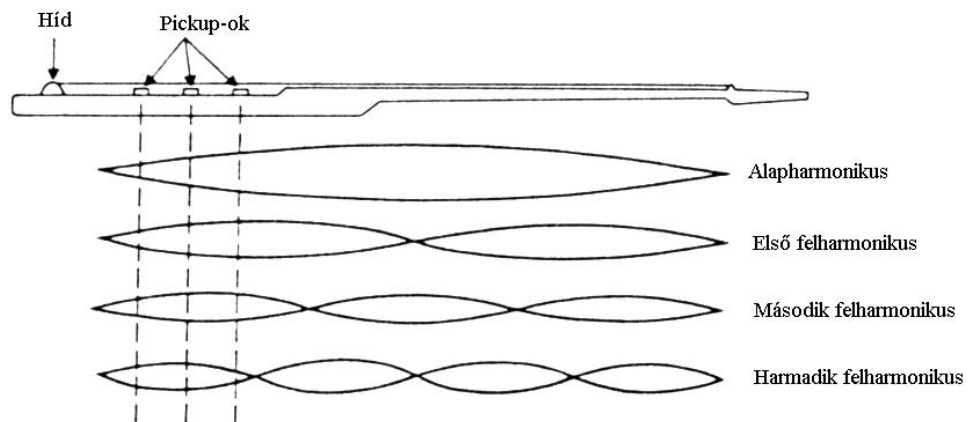
3.4 ábra „Humbucker” pickup (Fender)

Az elektromos gitár feltalálása óta rengetegféle pickup konstrukció látott napvilágot különböző gyártóktól. Ezek célja a zajmentesebb megszólalás, illetve a különböző jellegű hangzások elérése. Különböző pickup-ok készültek különböző zenei műfajokhoz. Léteznek passzív és aktív pickup-ok. A pickup hangjának egyik meghatározója például a tekercsben található mágnesek anyaga és elhelyezkedése. A mágnesek anyaga többnyire ferrit vagy valamilyen AlNiCo ötvözet. A tekercsek induktivitása körülbelül 5 H – 15 H között van. A mágnesek elhelyezkedése többnyire szimmetrikus a kisebb zaj elérésének érdekében (**3.5 ábra**).



3.5 ábra Mágnesek elhelyezkedése a pickupban [Bartolini2000]

Egy másik, a hang karakterét meghatározóan befolyásoló tényező a pickup elhelyezkedése a húr mentén. A legtöbb elektromos gitáron nem egy, hanem kettő vagy három pickup található. Ezek közül általában egy kapcsolóval lehet választani, vagy egy potméterrel állíthatjuk az adott pickup által a kimenetre juttatott feszültség mértékét. Míg a nyakhoz legközelebbi pickup szolgáltatja a legnagyobb alapharmonikust, addig a hídhoz legközelebbi lévő a legérzékenyebb a magasabb harmonikusokra [Fletcher] (**3.6 ábra**).



3.6 ábra A húr harmonikusai a különböző pickup-oknál

3.3 Az elektromos gitár hangjai

Egy oktáv 12 hangból áll, melyek 12 egyenlő hangközre osztják az oktávot. Mivel egy hang és oktávjának frekvenciája közötti kapcsolat $f_2 = 2f_1$, ezért erre a δ hangközre igaz, hogy $\delta^{12} = 2$, tehát $\delta = \sqrt[12]{2} = 1.0595$. Az így kapott hangsort egyenletesen temperált kromatikus hangsornak hívjuk. A hangsor hangjainak az elnevezése: c, cisz (desz), d, disz (esz), e, f (eisz), fisz (gesz), g, gisz (asz), a, aisz (b), h (cesz), c₁ (hisz).

Az elektromos gitárnak általában hat húrja van, amelyek E₂, A₂, D₃, G₃, H₃ és E₄ (f = 82, 110, 147, 196, 247 és 330 Hz) hangokra vannak hangolva. A gitár húrjai kvarthangolásúak, ami annyit jelent, hogy két szomszédos üres húr hangmagassága között egy tiszta kvart hangköz van, vagyis a két hang frekvenciája közötti kapcsolat: $f_2 = \sqrt[4]{2} f_1$. Kivételt képeznek a G₃ és H₃ húrok, ezek között ugyanis nem öt, hanem csak négy félhang található (azaz egy bővített terc). A húrok hangolásának alapjául a nemzetközi megállapodás szerinti normálhangot vesszük, amelynek értéke A₄ = 440 Hz.

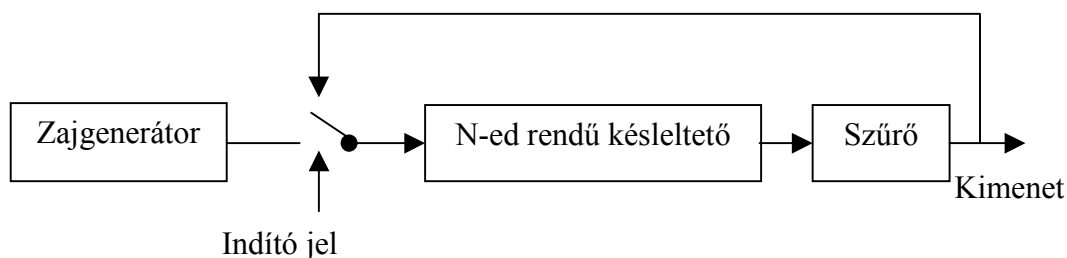
A gitár nyakán elhelyezett bundok határozzák meg a gitáron megszólaltatható hangmagasságokat. A legtöbb gitár nyakán 21, 22 vagy 24 bund van. A megszólaló hang magassága bundonként egy fél hanggal nő. Ez 24 bundos gitár esetén tehát azt jelenti, hogy a teljes megszólaltatható tartomány E₂-től E₆-ig tart (82 Hz – 1312 Hz). A legtöbb hangot többféleképpen is meg lehet szólaltatni (pl.: az A₂ hangot elérhetjük az A₂ húr megpendítésével, vagy az E₂ húr ötödik bundnál való lefogásával és megpendítésével), kivéve a legmélyebb és a legmagasabb öt hangot.

4. A gitár húrjának modellezése

Ebben a fejezetben a gitár húrjának viselkedését jól közelítő módszert, elrendezést keresünk. Elvárás, hogy a gerjesztést a húr bármely pontján be lehessen csatolni, és a húron levő jelet pedig bármely ponton ki lehessen csatolni, hiszen a valóságban is a húrt bármely pontján megpengethetjük, és a pickup-ot is elvileg bárhová elhelyezhetjük. Ezenkívül a húr hangmagassága és a frekvenciakomponensek lecsengésének valósághűsége is lényeges szempont. Az alábbiakban ismertetem a húr legegyszerűbb modelljét, majd az általunk is használt ún. digitális waveguide struktúrát részletesebben kifejtem. Ezekután a digitális waveguide hangmagasságának pontos beállítása következik, majd a végén egy, a húr veszteségeinek szimulálására alkalmas szűrő tervezésére térünk ki.

4.1 A Karplus-Strong algoritmus

A Karplus-Strong algoritmus egy fehér zajjal feltöltött késleltetővonal, melynek kimenete egy szűrőre kapcsolódik. A szűrő kimenete vissza van csatolva a késleltetővonal bemenetére [Smith1983] (4.1 ábra).



4.1 ábra A Karplus-Strong algoritmus

Az algoritmus egy fésűszűrőt valósít meg. A fésűszűrő rezonanciafrekvenciái a véletlen jelből kiemelkednek, illetve lassabban csengenek le, mint a zaj egyéb komponensei. Ezért a magára hagyott rendszerből egy idő után közel periodikus, kiemelkedő alapfrekvenciájú jelet kapunk.

Tehát a rendszerünk egy késleltetővonalból és egy azután kapcsolt aluláteresztő szűrőből álló visszacsatolt hurok. A hurok eredő átvitele így:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - H_a(z)H_k(z)} \quad (4.1)$$

ahol $H_a = (1+z^{-1})/2$ az aluláteresztő (átlagoló), $H_k(z) = z^{-N}$ pedig a késleltetővonal átvitele. A hurok elemeinek frekvenciátvitele így:

$$H_a(e^{-j\omega T}) = \frac{1 + e^{-j\omega T}}{2} = e^{-j\frac{\omega T}{2}} \cos\left(\frac{\omega T}{2}\right) \quad (4.2)$$

illetve

$$H_k(e^{-j\omega T}) = e^{-j\omega NT} \quad (4.3)$$

A hurok eredő késleltetése tehát közel $N+1/2$ minta, ami a zajból kiemelkedő alapfrekvencia (a hangmagasság) meghatározója.

A húr legegyszerűbb modellje tehát a Karplus-Strong algoritmus, mivel exponenciális lecsengésű, periodikus jelet hoz létre, akárcsak (mint ahogy később látni fogjuk) a húr. Az egyszerű átlagolószűrő alkalmazásának következtében a végeredmény a magasfrekvenciás komponensek gyors lecsengése miatt természetellenes. Ez még korrigálható másmilyen aluláteresztő szűrő beillesztésével. Nagyobb probléma viszont, hogy a hangmagasságon és a szűrőn kívül nincs állítható paraméter. Nem tudjuk sem a gerjesztés helyét, sem a kimenet helyét változtatni. Ennél is lényegesebb szempont, hogy a húr fizikai működéséhez nem sokkal jutottunk közelebb, ezért valami más, de ehhez hasonló struktúrát kell találnunk, melyben megtalálhatóak a Karplus-Strong algoritmus előnyei, a hátrányok nélkül.

4.2 A digitális waveguide struktúra

A waveguide modellezés alapja az a felismerés, hogy a húr időtartománybeli leírásához a hullámeqyenlet haladó hullám leírása használható [Smith1993]. Az ideális, egydimenziós rezgő húr hullámeqyenlete:

$$c^2 y'' = \ddot{y} \quad (4.4)$$

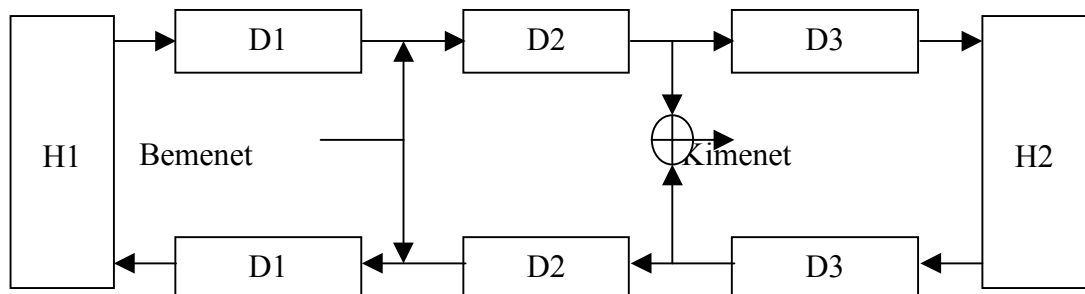
Ahol c a hullám terjedési sebessége, $y = y(x,t)$ pedig a húr elmozdulása az x helyen, a t időpillanatban. \ddot{y} y -nak az idő szerinti második, y'' pedig a hely szerinti második deriváltja. A hullámegyenlet általános megoldása:

$$y(x,t) = y^+(x+ct) + y^-(x-ct) \quad (4.5)$$

ahol y^+ és y^- a közegben c sebességgel, ellentétes irányban haladó hullámokat írják le. Ha a haladó hullámformák felülről sávkorlátozottak, akkor a haladó hullámegyenlet mintavételezésével ($t = nT$ és $x = mX$, ahol $X = cT$, n és m pedig természetes számok):

$$y[n,m] = y^+[n,m] + y^-[n,m] \quad (4.6)$$

adódik [Smith1993]. Ez az egyenlet úgy is értelmezhető, mint egy kétirányú késleltetővonal, ahol az $y^+[n,m]$ minták a pozitív, $y^-[n,m]$ pedig a negatív irányba haladnak. A modellből a jelet a késleltetővonal adott pontján a megfelelő minták szuperpozíciójával kaphatjuk (4.2 ábra).



4.2 ábra A húr waveguide modellje

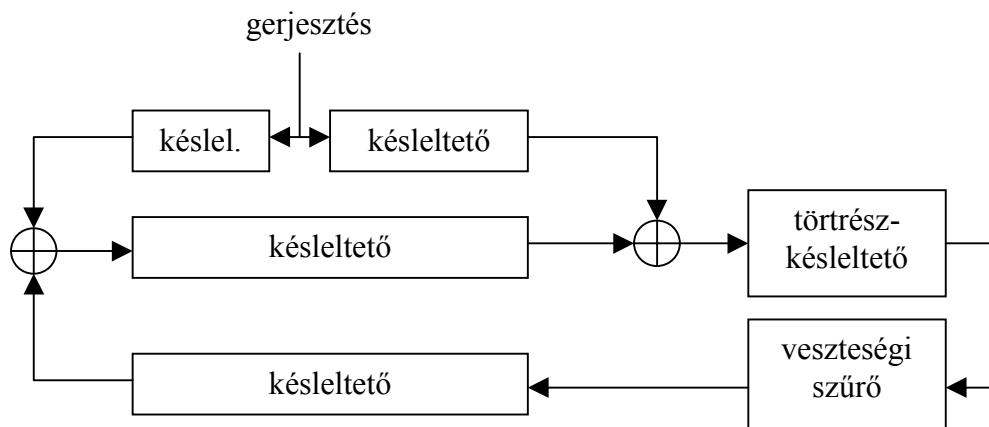
Ahol $H1$ és $H2$ a húr két végén található lezárások (aluláteresztő szűrők), $D1$, $D2$ és $D3$ pedig különböző hosszúságú késleltetővonalak.

Mint látható, ezzel az elrendezéssel megoldottuk a gerjesztés és a kimenet helyének a figyelembevételét. A modell pedig jól közelíti a valóságot, mivel a húr fizikai viselkedéséből indultunk ki. A Karplus-Strong algoritmus előnyeit is ki tudtuk

használni, hiszen a kapott struktúra hasonlít hozzá (visszacsatolt késleltetővonal aluláteresztő szűrővel) és ennek megfelelően a kapott hangmagasság is a késleltető számától függ.

4.2.1 A bővített waveguide

A szimuláció során ennél összetettebb modellt valósítottunk meg. A végleges modell tartalmaz egy harmadik késleltetővonalat is, mely a gerjesztés beviteléhez szükséges. Ennek okait majd az 5. fejezetben fejtem ki. A blokkvázlaton látható (4.3 ábra) még egy törtrész-késleltető és egy veszteségi szűrő is.



4.3 ábra A bővített húrmodell

Természetesen a húrról a jelet itt is bárhol kicsatolhatjuk a kimenetre, a gerjesztés bevitelének helyét pedig a gerjesztővonal két részének hosszával állíthatjuk be. A törtrész-késleltető a pontos hangmagasság beállításához szükséges, ennek okairól a következő fejezetben lesz szó. A veszteségi szűrő pedig a húrban keletkező veszteségeket modellezi.

4.3 A húr hangolása

Az elektromos gitár szintézisének (ill. az összes zenei szintézisének) a hang alaphangmagasságjának pontos beállítása alapvető fontosságú. A waveguide modellnél ehhez szükség van egy úgynevezett törtrész-késleltető implementálására. A modellben ugyanis a késleltetővonalal pontosan meghatározható hangmagasságokat korlátozza az

$$N = \frac{f_s}{f_0} \quad (4.7)$$

összefüggés, ahol N a használt késleltetők száma, f_s a mintavételi frekvencia, f_0 pedig a hang alaphangfrekvenciája. Látható, hogy a legtöbb frekvencián ez nagy valószínűséggel nem lesz egész szám. Mivel csak egész számú késleltető alkalmazása lehetséges, ezért szükség van egy olyan szűrőre amely a hurokba beillesztve az amplitúdó-átvitelen nem változtat, de képes egész számtól eltérő időt késleltetni.

Erre a célra egy elsőfokú mindenáteresztő szűrő megfelelő, mivel van állítható fázis-késleltetése és amplitúdó-átvitele 1. Tehát a szükséges késleltetők száma az f_0 alaphangfrekvencia pontos eléréséhez (4.7)-ből adódik. Ennek a késleltetővonal, a veszteségi szűrő és a mindenáteresztő szűrő eredő késleltetésével kell megegyeznie.

$$\frac{f_s}{f_0} = D_{wg}(f_0) + D_{lp}(f_0) + D_{ap}(f_0) \quad (4.8)$$

Ahol D_{wg} a késleltetővonal hossza (késleltetése), D_{lp} a veszteségi szűrőé, és D_{ap} a törtrész-késleltetőé [Válimäki1995]. Így a törtrész-késleltetővel megvalósítandó fáziskésleltetés:

$$D_{ap}(f_0) = \frac{f_s}{f_0} - D_{wg}(f_0) - D_{lp}(f_0) - 0.5 \quad (4.9)$$

ahol a 0.5 kivonására azért van szükség, hogy a törtrész-késleltetés értéke $0.5 \leq D_{ap} \leq 1.5$ legyen, mivel ez az a tartomány, ahol az elsőfokú mindenáteresztő szűrő a legjobban működik.

Az elsőfokú mindenáteresztő szűrő átviteli függvénye:

$$H_{lap}(z) = \frac{a_1 + z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (4.10)$$

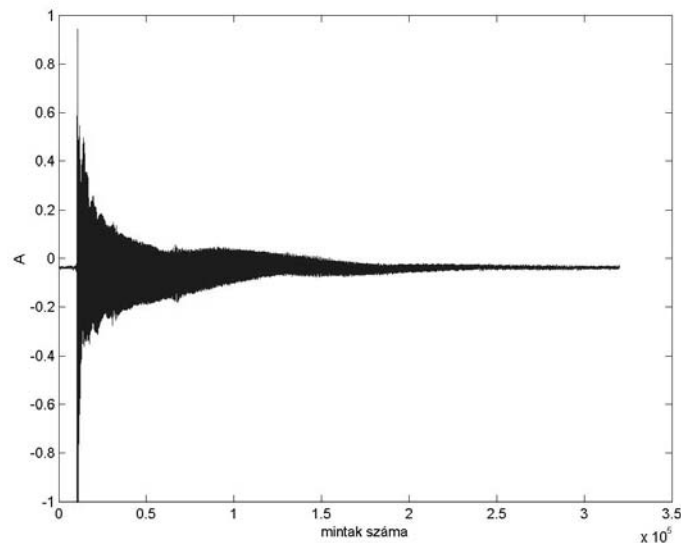
Az a_1 szűrőparamétert jó közelítéssel az

$$a_1 = \frac{1 - D_{ap}(f_0)}{1 + D_{ap}(f_0)} \quad (4.11)$$

összefüggés segítségével számolhatjuk ki [Válimäki1995].

4.4 A veszteségi szűrő

A veszteségi szűrő a húrból és lezárásaiban keletkező veszteségeket modellezi. A megpendített húr hangjának lecsengése exponenciális jellegű (**4.4 ábra**). Éppen ezért a pengetett húros hangszerek húrjaiban keletkező veszteségek modellezésére a legegyszerűbb és a valósághoz jól közelítő megoldás egy egypólusú, aluláteresztő IIR szűrő, mely időtartományban szintén exponenciális lecsengést hoz létre.



4.4 ábra A húron megpendített D hang időfüggvénye

Egy ilyen egypólusú szűrő átviteli függvénye a következő:

$$H_{1p}(z) = g \frac{1}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (4.12)$$

A szűrő paramétereinek meghatározása nem triviális feladat, a továbbiakban ezen paraméterek meghatározásának egy egyszerű módjáról lesz szó. A módszer hátránya, hogy a lemért lecsengési időket nem teljesen pontosan adja vissza, de a magának a jelenségnek a szimulálására tökéletesen megfelel a kapott eredmény.

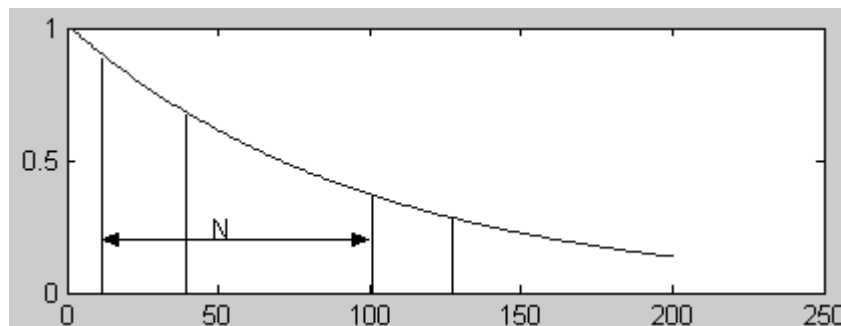
4.4.1 A paraméterek meghatározása méréssel

A gitár minden egyes hangjához kellene egy egypólusú aluláteresztő szűrőt tervezni, mert a lefogott hangra jellemző a lecsengési idő. Példaként tervezzünk egy ilyen szűrőt. Legyen ez a szűrő az elektromos gitár A húrjának D hangja.

A mérés elve a következő volt: A kellően megtámasztott gitár húrlábjához közel viasszal a gitár testére rögzítettünk egy rezgésérzékelőt. Azért ezt a megoldást választottuk, mert a mikrofonos elrendezés túl zajos volt, a pickupról jövő jelnek a magas frekvenciás komponenseit kiszűrte a pickup (lásd 6.1 fejezet). A rezgésérzékelő jelét jelkondicionálás után a számítógép hangkártyájának bemenetére kötöttük és a kimeneti jelet rögzítettük. Az eredményeket MatLab-bal dolgoztuk fel.

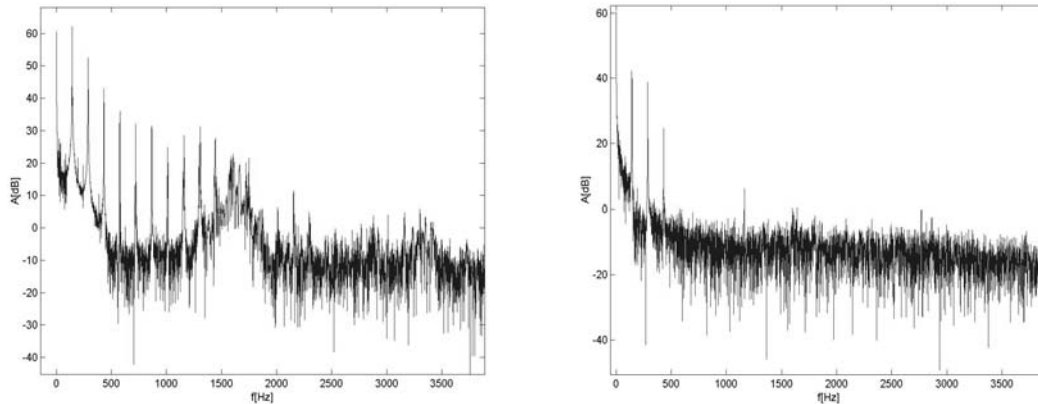
4.4.1.1 A lecsengési idő meghatározása

Tételezzük fel, hogy az **4.5 ábrán** látható görbe egy hang lecsengésének burkolója. A hangból a lecsengési tartomány elejéről, és egy későbbi szakaszából kivágunk egy tartományt. A két tartomány közötti távolság N db minta. A két tartomány hamming ablakkal való szorzása utáni spektrumának vizsgálatából lehet kiszámolni a lecsengési időt. Az ablakozásra az amplitúdó torzulás miatt van szükség, erre a célra a flat-top ablak lenne a legalkalmasabb, de Matlabban erre nincs előre megírt függvény.



4.5 ábra Az időfüggvényből kivágott két tartomány

Az **4.6 ábrán** látható a **4.4 ábrán** lévő időfüggvény két különböző szakaszának spektruma. A két szakasz egymástól $N = 169000$ mintányi távolságra van.



4.6 ábra Az időfüggvény két különböző szakaszának spektruma

Természetesen a különböző harmonikusok ugyanazon a frekvencián vannak mindkét esetben. Ebből a két ábrából származtatható a lecsengési állandó a következőképpen:

$$\lambda = \sqrt[N]{10^{\frac{A_1[db] - A_2[db]}{10}}} \quad (4.13)$$

Ahol N a két lecsengési szakasz távolsága, A_1 a lecsengési szakasz elején az adott harmonikus amplitúdója decibelben, A_2 pedig a lecsengési szakasz későbbi részén ugyanannak a harmonikusnak az amplitúdója szintén decibelben. A kapott λ értékekből a lecsengési idők már származtathatók. Mivel

$$\lambda = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \quad (4.14)$$

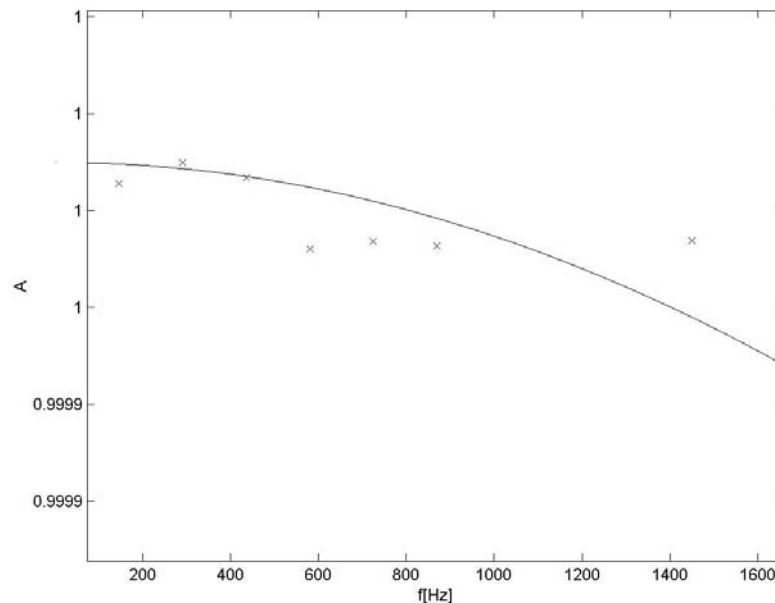
Ha vesszük mindkét oldal természetes alapú logaritmusát, és a kapott egyenletet kifejezzük τ -ra:

$$\tau = -\frac{1}{f_s \ln \lambda} \quad (4.15)$$

Mivel $t = N\Delta t$ és N -nel való egyszerűsítés után $f_s = 1/\Delta t$. Ez a lépés azért volt fontos, mert még nem tudjuk, hogy az adott DSP processzoron való megvalósítás folyamán milyen mintavételi frekvenciát engedhetünk majd meg magunknak, és τ nem függ f_s -től [Bank2000].

4.4.1.2 A veszteségi szűrő átviteli függvényének meghatározása

A szűrő paramétereit a következő egyszerű, de nem túl pontos módszerrel határoztuk meg. Az első néhány lecsengési állandóhoz próbáltunk olyan szűrőt választani amely minél jobban illeszkedik erre az öt pontra. Közben arra is ügyelni kellett, hogy a szűrő amplitúdóátvitele 1 alatti legyen, hogy a húr nehogya ennek következtében begerjedjen. Az illesztést grafikusán, Matlab-ban oldottuk meg.



4.7 ábra 6 db λ értékre illesztett egypólusú szűrő

Az öt megjelölt pont a A húron megpendített D hang alap- és első négy felharmonikusához tartozó λ érték. Az így kapott szűrő átviteli függvénye:

$$H_{1p}(z) = \frac{0.99849}{1 - 0.0015z^{-1}} \quad (4.16)$$

Tehát ezt a 4.7 ábrán látható amplitúdó-karakterisztikájú szűrőt kell implementálni veszteségi szűrőként a DSP processzoron.

5. A gerjesztés modellezése

Az elektromos gitár húros hangszer. Egy húros hangszer hangjának egyik legfontosabb meghatározó eleme az alkalmazott gerjesztés. Sokféle húros hangszer van, éppen ezért többféle gerjesztés ismert, például: ütés (zongora), vonás (hegedű), pengetés (gitár, citera). Gitárnál az alkalmazott gerjesztés a pengetés.

Ha egy zenész játszik a gitáron, a megszólaló hangot nagyban befolyásolja a megszólaltatás módja. A hang tulajdonságaira nemcsak a húr tulajdonságai, a test felépítése és a pickup karakterisztikája hat, hanem emellett a pengetés, és a pengetést meghatározó paraméterek is. Nem mindegy, hogy a húrt melyik pontján gerjesztjük, mint ahogyan az sem, hogy a pickup-ot hova helyezzük. Fontos paraméter még a pengetés ereje, a gerjesztő test (ujj, pengető) tömege, keménysége és tompító hatása. Nem szabad elfeledkezni a húr fizikai paramétereiről sem, úgymint a húr tömege és a húrban feszülő erő, ugyanis különféle típusú húroknak különböző a hangja is.

Célunk egy olyan fizikai gerjesztés-modell kialakítása, amely tartalmazza, és figyelembe veszi a fentebb említett paramétereket, és a paraméterváltozások hatására történt hangváltozások jól közelítik a valóságot.

Ha megfigyelünk egy gitárost játék közben, jó néhány paramétert vehetünk észre, amit a zenész szabadon változtathat, hogy különféle hangokat produkáljon:

- pengetés helyének változtatása
- a húr gerjesztésének módja
- a húr elengedésének módja

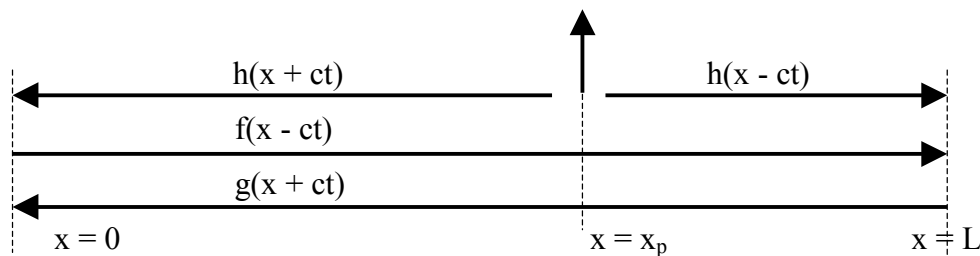
Amíg a pengetés helye egy konkrét paramétertől függ (hely), addig a többi paraméter jóval komplexebb, több változótól függ (pl.: a kapcsolat ideje, a gerjesztő test fizikai paraméterei, a gerjesztési erő és annak változása az időben). Látható, hogy egy olyan gerjesztés-modell kialakítása, mely figyelembe veszi az összes említett paramétert, nem triviális feladat. Kiindulási alapunk a digitális waveguide alapegyenletei, a húr egyensúlyi egyenlete és a gerjesztő test egyensúlyi egyenlete.

5.1 A gerjesztés alapegyenletei

Az általunk megalkotott gerjesztés-modellhez az alapot G. Cuzzucoli és V. Lombardo két, ebben a témában íródott cikke adta [Cuzzucoli1997, Lombardo1999]. Az általuk felírt egyenletrendszer megoldása viszont szerintünk különbözik az ő általuk megadottól, ezért a saját modellünkben a saját eredményeinkre támaszkodtunk.

Amikor gerjesztjük a húrt egy tetszőleges pontján, akkor a húr összes pontjának mozgása leírható négy hullámmal (**5.1 ábra**). Ezek a következők:

- a pengetés helyétől a híd felé haladó hullám
- a pengetés helyétől a nyereg felé haladó hullám
- a hídnál visszapattanó nyereg felé haladó hullám
- a nyeregnél visszapattanó híd felé haladó hullám



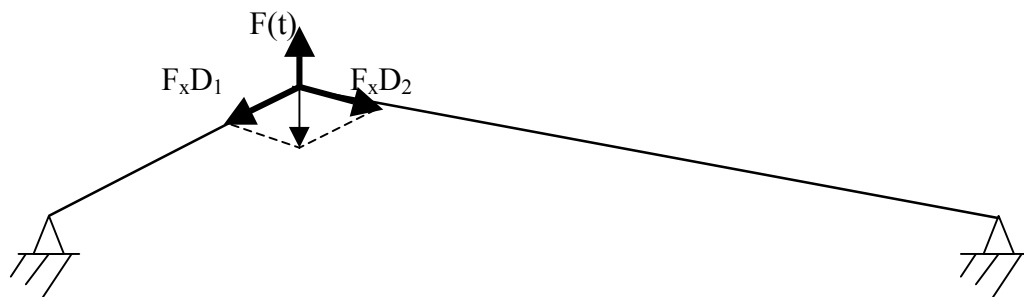
5.1 ábra A húrban haladó hullámok

Így a húr kitérése a húr bármely pontján (4.5) alapján, ha a pengetés helye $x = x_p$:

$$\begin{aligned}
 y(x,t) &= f(x - ct) + g(x + ct) + h(x + ct), \text{ ha } x < x_p \\
 y(x,t) &= f(x - ct) + g(x + ct) + h(x - ct), \text{ ha } x > x_p \\
 y(x_p,t) &= f(x_p - ct) + g(x_p + ct) + h(x_p,t), \text{ ha } x = x_p
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

A gerjesztő hullám $h(x,t)$, csak a gerjesztési mechanizmustól függ, a haladó hullámok $f(x,t)$ és $g(x,t)$ pedig csak a lezárások veszteségeitől [Lombardo1999].

A húrt a pengetési pontban kitérítő erőt a húrban feszülő erő kitérítés miatti megnövekedése tartja egyensúlyban (**5.2 ábra**).



5.2 ábra A húrt egyensúlyban tartó erők kitérítéskor

Kis kitérés esetén a következő egyenlőség áll fenn:

$$F(t) = F_x \left[\left. \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|_{x < x_p} - \left. \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|_{x > x_p} \right] = F_x D \quad (5.2)$$

ahol $F(t)$ a húrt kitérítő erő, F_x a húr feszültsége, y a húr merőleges elmozdulás, x a vizsgált húrszakasz hossza [Lombardo1999]. Ez a húr egyensúlyi egyenlete.

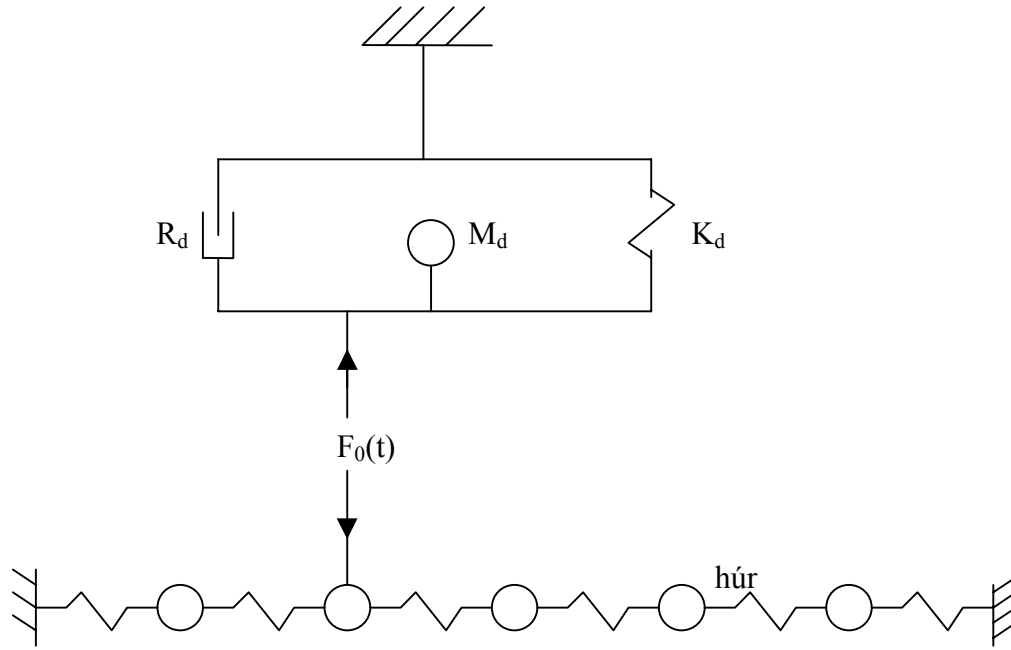
Tételezzük fel, hogy a gerjesztő testet leírja a tömege M_d , a keménysége K_d és egy tompítási együttható R_d . A húrra ható eredő erő $F(t)$ függ továbbá a gerjesztő test által kifejtett erőtlől $F_0(t)$ is. Így a húrra ható erők alapján:

$$F(t) = F_0(t) - (M_d + \mu \Delta) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - R_d \frac{\partial y}{\partial t} - K_d y \quad (5.3)$$

ahol μ a húr egységnyi hosszra eső tömege, Δ pedig az általunk használt egységnyi hossz [Lombardo1999].

5.1.1 A gerjesztő test mechanikai modellje

Ha (5.3)-at egy mechanikai hálózatot leíró képletként nézzük, akkor fel tudjuk rajzolni a gerjesztő test mechanikai modelljét (**5.3 ábra**).



5.3 ábra A gerjesztő test mechanikai modellje

5.1.2 A húr gerjesztése

Ahhoz, hogy a digitális waveguide által reprezentált húrunkat tudjuk gerjeszteni a fenti egyenletrendszer (5.1), (5.2), (5.3) diszkrét idejű megoldása szükséges. Ennek érdekében a három egyenletet mintavételezzük helyben és időben, mégpedig úgy, hogy az arány a térbeli minták Δ és az időbeli minták T között a húron haladó hullám terjedési sebessége c legyen ($\Delta = cT$). A mintavételezett egyenletek:

$$y(n,m) = f(n,m) + g(n,m) + h(n,m) = w(n,m) + h(n,m) \quad (5.4)$$

$$F_x D = F_x \left[\frac{y(n_p, m) - y(n_p - 1, m)}{\Delta} - \frac{y(n_p + 1) - y(n_p, m)}{\Delta} \right] \quad (5.5)$$

$$F(m) = F_0(m) - (M_d + \mu\Delta) \frac{y(n_p, m + 1) - 2y(n_p, m) + y(n_p, m - 1)}{T^2} - R_d \frac{y(n_p, m) - y(n_p, m - 1)}{T} - K_d y(n_p, m) \quad (5.6)$$

Ha (5.5)-be behelyettesítjük (5.4)-et, akkor a következő összefüggést kapjuk:

$$F_x D = \frac{F_x}{\Delta} [2(w(n_p, m) + h(n_p, m)) - w(n_p - 1, m) - w(n_p + 1, m) - h(n_p - 1, m) - h(n_p + 1, m)] \quad (5.7)$$

Ezekután (5.6)-ba behelyettesítjük (5.4)-et, és az így kapott egyenletet (5.7)-be behelyettesítve és kifejezve $h(n_p, m+1)$ -re a következőt kapjuk, mivel $F(m) = F_x D$:

$$\begin{aligned} h(n_p, m+1) \frac{(M_d + \mu\Delta)}{T^2} &= [w(n_p, m) + h(n_p, m)] \cdot \left(\frac{2(M_d + \mu\Delta)}{T^2} - \frac{R_d}{T} - K - \frac{2F_x}{\Delta} \right) + \\ &+ w(n_p, m+1) \cdot \left(-\frac{M_d + \mu\Delta}{T^2} \right) + [w(n_p, m-1) + h(n_p, m-1)] \cdot \left(\frac{R_d}{T} - \frac{M_d + \mu\Delta}{T^2} \right) + \\ &+ [w(n_p - 1, m) + w(n_p + 1, m) + h(n_p - 1, m) + h(n_p + 1, m)] \cdot \left(\frac{F_x}{\Delta} \right) + F_0(m) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Közös nevezőre hozva (5.8)-at és leegyszerűsítve $\frac{T^2}{M + \mu\Delta}$ -val a következő végeredményhez jutunk:

$$\begin{aligned} h(n_p, m+1) \cdot c_0 &= [h(n_p, m) + w(n_p, m)] \cdot c_1 + w(n_p, m+1) \cdot c_2 + [h(n_p, m-1) + w(n_p, m-1)] \cdot c_3 + \\ &+ [h(n_p + 1, m) + h(n_p - 1, m) + w(n_p + 1, m) + w(n_p - 1, m)] \cdot c_4 + F_0(m) \cdot c_5 \end{aligned} \quad (5.9)$$

amivel a gerjesztés értéke a pengetési pontnál megadható, figyelembe véve a gerjesztő test fizikai tulajdonságait, és a húr jelenlegi állapotát. Az (5.9) egyenletben található konstansok értéke:

$$\begin{aligned}
 c_0 &= 1 \\
 c_1 &= 2 - \frac{R_d T}{M_d + \mu \Delta} - \frac{K_d T^2}{M_d + \mu \Delta} - \frac{2F_x T^2}{\Delta(M_d + \mu \Delta)} \\
 c_2 &= -1 \\
 c_3 &= -1 + \frac{R_d T}{M_d + \mu \Delta} \\
 c_4 &= \frac{F_x T^2}{M_d + \mu \Delta} \\
 c_5 &= \frac{T^2}{M_d + \mu \Delta}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

5.2 A gerjesztés paramétereinek beállítása

A húr megpendítését három szakaszra bontjuk: felfutási szakasz, elengedési szakasz és tompítás. Egy gitáros játék közben tudatosan változtatja a pengetés paramétereit úgy, hogy a gitár a kívánalmainak megfelelően szólaljon meg. A gitáros játékát alaposan megfigyelve megtalálhatóak a pengetés paramétereinek jellegzetes értékei.

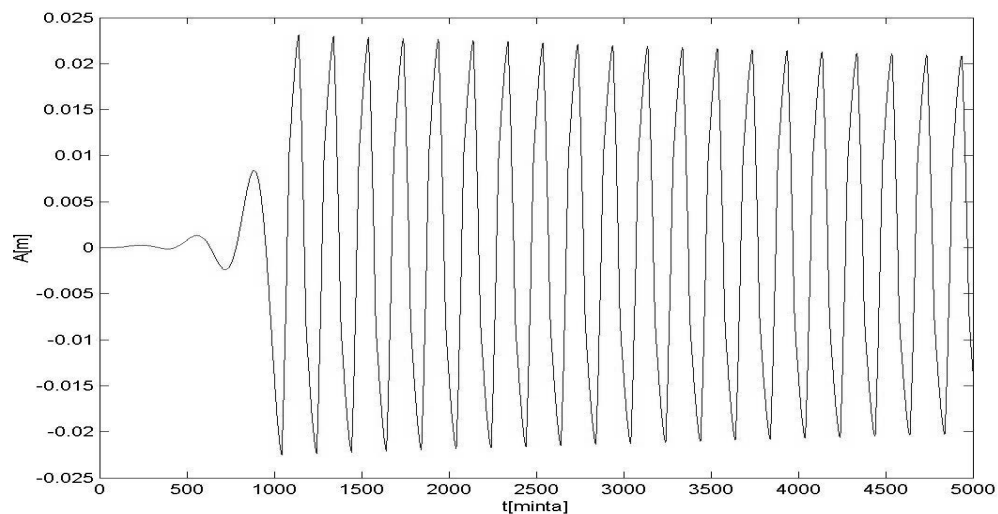
A pengetés ereje a húr elengedés előtti kitérésével arányos és a megszólaló hang hangerejét is befolyásolja. A kitérés körülbelül 1 mm (piano) és 5 mm (forte) között mozog általában, ez körülbelül 1 N és 5 N közötti erőnek felel meg [Cuzzucoli1997].

A gerjesztő test (ujjbegy, köröm, pengető) tömegét nem mindig lehet egyértelműen megmérni, értéke attól is függ, hogy a zenész laza vagy megfeszített ujjal penget. Mennyiségileg a gerjesztő test tömege valahol az elektromos gitár pengetője (0.2 g) és a zongora kalapácsa (10 g) között van. A reális értéktartomány 0.2 g és 3 g között van [Cuzzucoli1997].

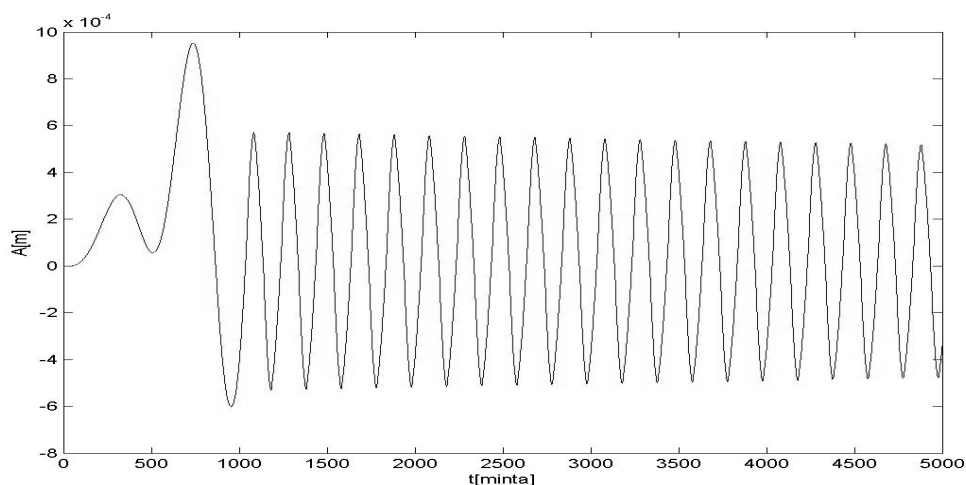
Nagyban meghatározza a megszólaló hang karakterét a gerjesztéshez használt test anyaga, illetve a pengetés módja. Körömmel vagy pengetővel pengetés esetén a gerjesztő test szerepe inkább a kitérítés, a húr csak rövid ideig csúszik a pengetés közben. Ujjbeggyel való pengetésnél a húr lassabban csúszik végig az ujjon, tompítva ezzel a húr mozgását. Attól függően, hogy hogyan penget a zenész, csuklóból vagy csak az ujját mozdítja, illetve begörbíti az ujját vagy kiegyenesített ujjal penget, változik a keménység és tompítás mértéke.

A gerjesztő test keménysége K_d . A köröm keménysége körülbelül megegyezik egy pengető keménységével. A keménység elfogadható értéktartománya $K_d = 0$ (amikor kizárólag puha ujjbeggyel pengetünk) és $K_d = 3000$ N/m (amikor körömmel vagy pengetővel pengetünk) között van [Cuzzucoli1997].

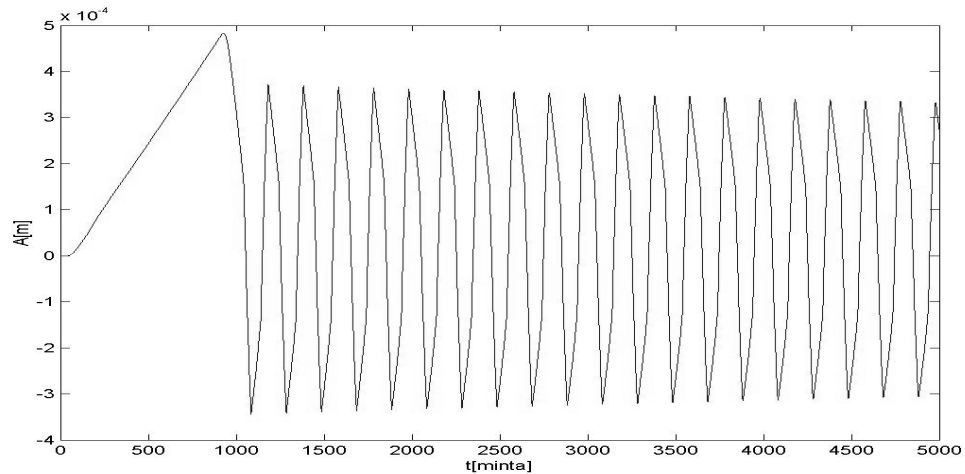
Az 5.4-es és az 5.5-ös, illetve az 5.6-os és az 5.7-es ábrákat összehasonlítva láthatjuk a gerjesztő test tömegének hatását a gerjesztésre, különböző tompítási együtthatók esetén. Jól látható, hogy erős tompítás esetén a tömeg hatása jóval kisebb, mint kis R_d értékek esetén. A gerjesztő test tömegének hatása kis tompítás mellett figyelhető meg.



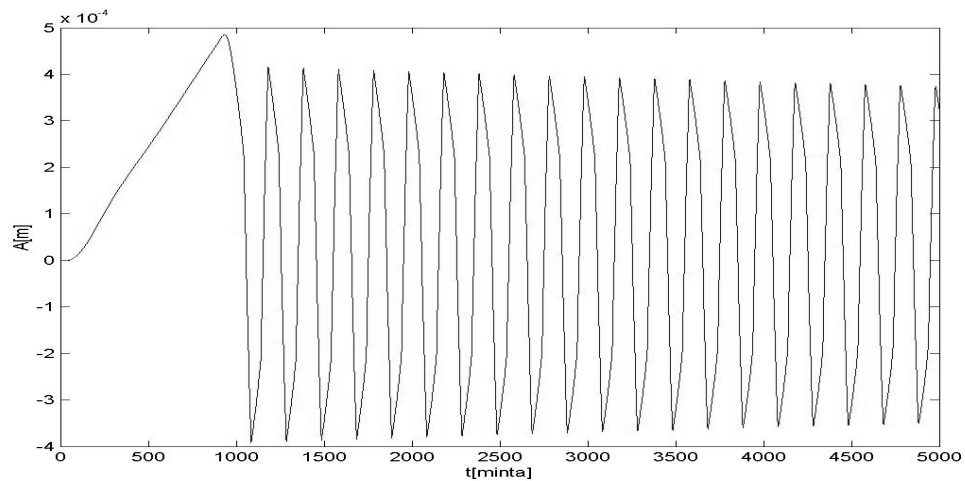
5.4 ábra A húr kitérése ha $M_d = 0.5$ g és $R_d = 1$



5.5 ábra A húr kitérése, ha $M_d = 3$ g és $R_d = 1$



5.6 ábra A húr kitérése, ha $M_d = 0.5\text{g}$ és $R_d = 6$



5.7 ábra A húr kitérése, ha $M_d = 3\text{g}$ és $R_d = 6$

5.2.1 A gerjesztés felfutási szakasza

Kétféle gerjesztést értelmezünk húros hangszereknél. A pengetést (mint a csembalóban a tollszár) és az ütést (mint a zongora kalapácsa). Pengetés esetén az ujj nyugalmi állapotban van a húron, ütés esetén az ujj valamilyen sebességgel érkezik. Az elektromos gitár esetében a húr nézőpontjából nincs különbség a kétféle gerjesztés között: a húrt először kitérítjük valamilyen módon, aztán elengedjük, a megszólaló hang nem függ az ujj sebességétől. A kitérítés módjától azonban függ a megszólaló hang karaktere. Ha rövid, impulzusszerű gerjesztést alkalmazunk: apoyando-nak, illetve ha a

húrt a nyak felé, merőlegesen mozdítjuk: tapping-nek hívjuk, ha pedig a húrt fokozatosan feszítjük meg: tirandonak hívjuk. Gerjesztés modellünkben az apoyando-t ugrásszerű erő beadásával írjuk le ($F(t) = F_0$), amit rövid ideig tartunk, majd elengedjük. Tirando esetén az erőt lineárisan növekvőnek feltételezzük a gerjesztés időtartamára [Cuzzucoli1997]:

$$F(t) = F_0 \frac{t}{t_{gerj}} \quad (5.11)$$

5.2.2 A gerjesztés elengedési szakasza

Amikor a húrt kitérítő erő hirtelen megszűnik, akkor a húrból felhalmozódott belső feszültség, kiegyensúlyozó erő hiányában, hirtelen mozgásba hozza a húr lezárások közötti egész hosszát. Ha hirtelen engedjük el, akkor a húr magasabb módusait gerjesztjük, ez a hatás megszüntethető, ha húrt lassabban, fokozatosan engedjük el. Az elengedés módját a zenész azzal határozza meg, hogy az ujjbegyéről (vagy a pengetőről) lassan vagy gyorsan engedi lecsúszni a húrt. Elengedés közben a gerjesztő test egy ideig még mindig kapcsolatban van a húrral, és közben nemcsak az elengedés idejétől, hanem a gerjesztő test jellemzőitől függően is változik a hang karaktere. Modellünkben az elengedést a kitérítő erő fokozatos, lineáris csökkentésével írjuk le [Cuzzucoli1997]:

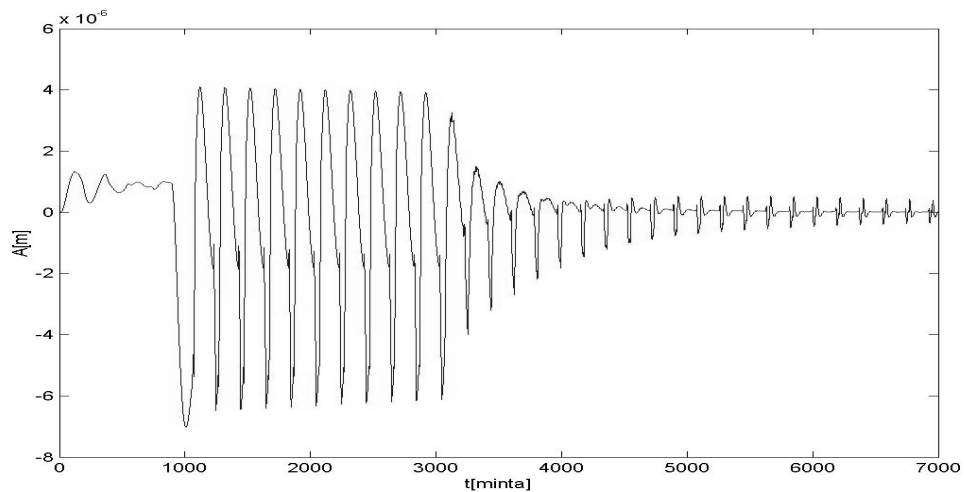
$$F(t) = F_{\max} \left(1 - \frac{t - t_{gerj}}{t_{elenged}} \right) \quad (5.12)$$

5.2.3 A húr tompítása

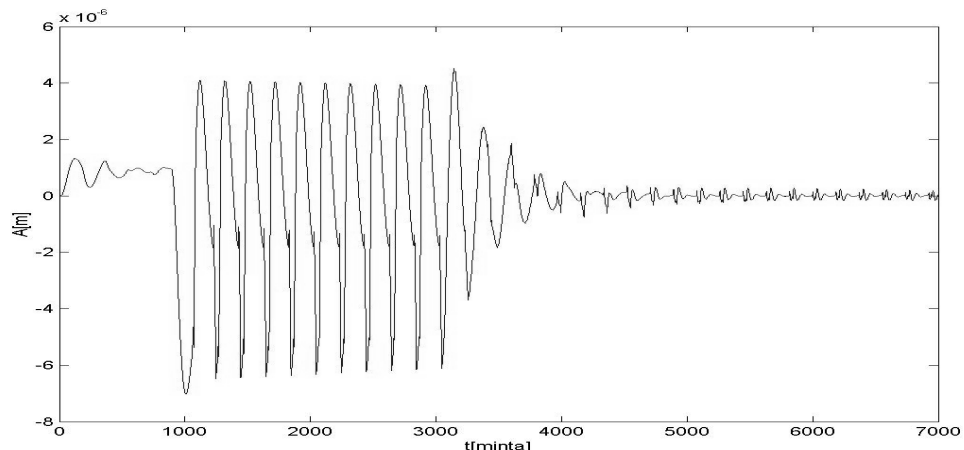
A megszólaló hang hosszának szabályozásához a zenésznek a megfelelő időpillanatban meg kell állítania a húr rezgését. Mielőtt újra megpendítené a húrt le kell csillapítani a húr mozgását, hogy minimálisra csökkentse a gerjesztő test és a húr érintkezésének zaját. Ezt általában úgy lehet elérni, hogy a húrhoz finoman hozzáérünk

az ujjbegyünkkel anélkül, hogy erőt fejtenénk ki rá. Ezt a jelenséget úgy modellezzük, hogy a gerjesztési modellünkben található gerjesztő test összes paraméterét nullára állítjuk, kivéve a tompítási együtthatót. A lecsengés burkolója exponenciális, de jóval kisebb időállandóval, mint amit a húr saját lecsengésénél tapasztaltunk. A különböző tompítási együtthatók különböző lecsengést eredményeznek (5.8 és 5.9 ábra).

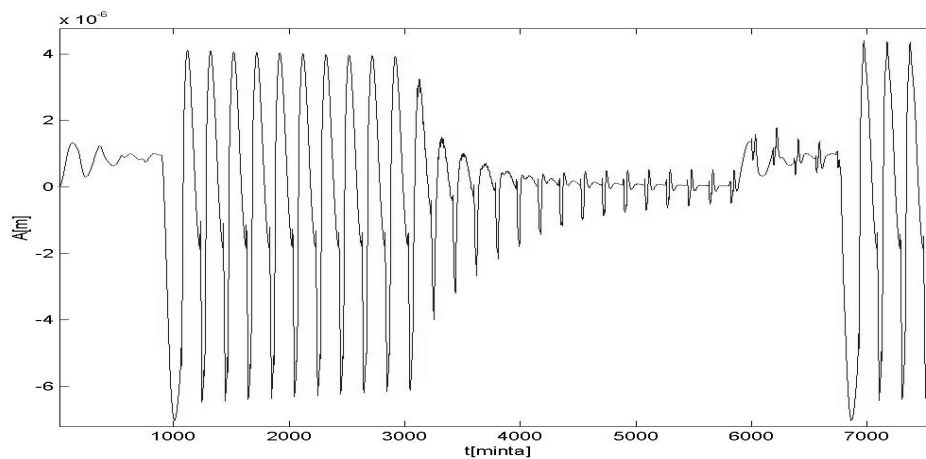
Két egymás után megszólaltatott hang esetén is az elvárásoknak megfelelően működik a modell. A második megszólaló hangnál általában az 5.10 ábrán látható hatás (a második hang gerjesztése módosul, a még mozgásban lévő húr miatt) nem befolyásolja hallhatóan a megszólaló hangot, de ha a gerjesztésnek rövid a felfutási ideje, vagy a fentebb ismertetett apoyando pengetést alkalmazzuk, akkor ez a hatás jól hallható.



5.8 ábra A tompítás hatása, ha $R_d = 5$



5.9 ábra A tompítás hatása, ha $R_d = 2$



5.10 ábra A tompítás hatása két hang között ($R_d = 5$)

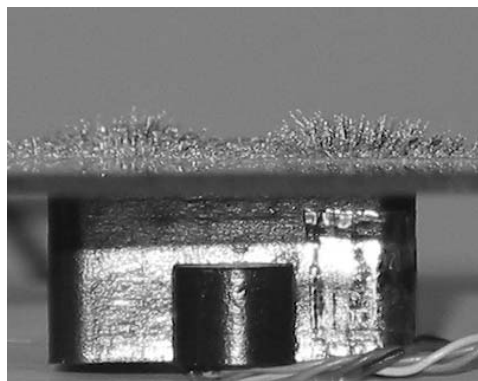
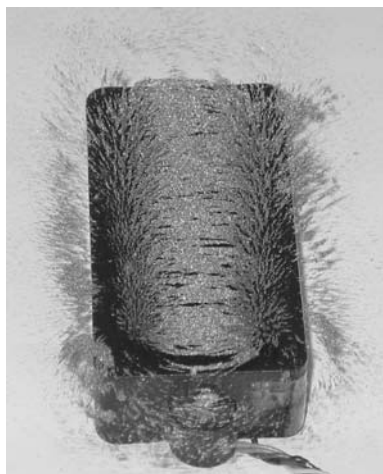
6. A pickup modellezése

Mint azt már tudjuk, a pickup feladata az elektromos gitárban a húr rezgését elektromos jellé alakítani. Ahhoz, hogy a pickup-ot be tudjuk építeni szintézisünkbe, szükséges a pickup egy olyan modellje, amely jól közelíti a valóságot, de megvalósítása nem túl bonyolult. Egy ilyen modell megalkotásához szükséges a pickup működési mechanizmusainak ismerete. Mint látni fogjuk, az alapvető elgondolásainkon kívül méréseink rámutattak a pickup néhány érdekes, eddig nem ismert tulajdonságára, melyeket a modell megalkotásánál is figyelembe kellett vennünk. Ilyen tulajdonságok például a pickup nemlinearitása, átlagoló és deriváló hatása. Ezek közül az átlagoló és a deriváló hatás újdonságnak számít, a szakirodalomban ezekre a jelenségekre való utalást nem találtunk.

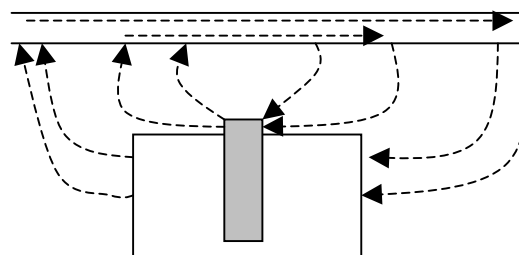
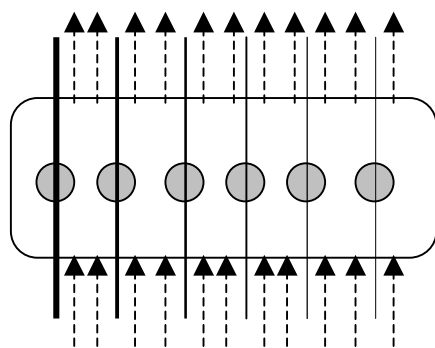
Ebben a fejezetben először a pickup felépítésével, működésével fogunk foglalkozni, ezután a pickup-pal kapcsolatos méréseket ismertetjük, végül a mérési eredmények alapján alkotjuk meg azt a modellt, amit majd megvalósíthatunk.

6.1 A pickup fizikája

A pickup elemi alkotórészei a tekercs és a belsejébe elhelyezett mágnes. A fémből készült húr elmozdulása megváltoztatja a mágneses tér fluxusát és a mágneses tér (**6.1 ábra**) változása feszültséget indukál a tekercs meneteiben [Fodor1996]. Az így keletkező feszültség az erősítendő elektromos jelünk. A pickup mágneses terét az éppen vizsgált pickup mágnes-elrendezése határozza meg, de abból a szempontból minden pickup tere megegyezik, hogy az erővonalak a húrokkal párhuzamosan futnak, és a mágneses erővonalak a húrokon keresztül záródnak (**6.2 ábra**).



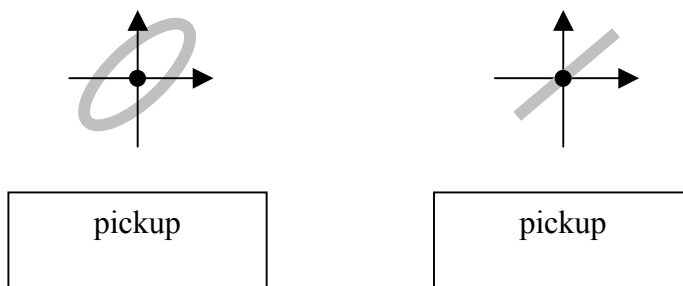
6.1 ábra Pickup terének vizsgálata vasporral (felül- és oldalnézetből)



6.2 ábra A pickup mágnesének tere felül- és oldalnézetből

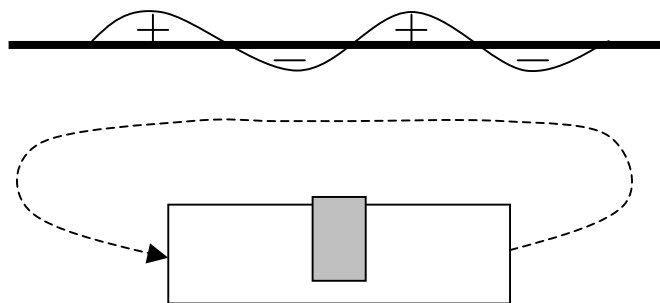
Tehát a feszültségváltozást a húr elmozdulása okozza, ezért érdemes megfigyelni, hogy a húr megpendítés esetén milyen pályát ír le. A pickup mérésének szempontjából az lenne a legjobb, ha a húr a pickupra merőlegesen vagy párhuzamosan mozdulna el megpendítése esetén, ez azonban nincs így. Megfigyeléseink alapján a húr a valóságban általános kitérítés esetén először valamilyen ellipszis alakú pályát ír le, ahol az ellipszis középpontja a húr nyugalmi helyzete, majd fokozatosan áll be az ellipszis hosszabb átlójának megfelelő egyenes pályára, de legtöbbször ez az egyenes pálya sem párhuzamos vagy merőleges a pickup-ra (**6.3 ábra**). Ez bonyolítja a helyzetet, mivel a mágnes tere durva közelítéssel is csak a pickup-pal párhuzamosan tekinthető homogénnek. A húr távolsága a pickup-tól elmozdulás közben folyamatosan változik, ezzel a húr és pickup közötti mágneses ellenállás is folyamatosan változik. Emiatt a nehezen leírható mozgás és a pickup terének feltételezett inhomogenitása miatt arra

következtethetünk, hogy a húr kitérése és a pickup tekercsének kimenetén keletkező feszültség közötti kapcsolat nemlineáris. Ha ez így van, akkor a nemlinearitás mértéke a húr amplitúdójának növekedésével növekszik. Mint azt később látni fogjuk, ez az állítás beigazolódik.



6.3 ábra A húr kitérése közvetlenül a pendítés után és kicsit később

Méréseink során figyelmesek lettünk még két olyan hatásra, amelyek a pickup-ról szóló nagyon kevés irodalom miatt eddig elkerülték figyelmünket. Az egyik ilyen jelenség a pickup átlagoló hatása. A pickup terének méretei miatt a pickup terének húrral párhuzamos hosszánál rövidebb hullámhosszú felharmonikusok a mágneses tér szimmetriájának következtében jóval kisebbek lesznek, vagy teljesen kiátlagolódnak (**6.4 ábra**).



6.4 ábra A pickup átlagoló hatása

Emiatt a pickup aluláteresztő szűrőként működik, melynek vágási frekvenciája mindegyik húrra különböző. Ennek oka, hogy mind a hat húr ugyanolyan hosszú, viszont alaphfrekvenciájuk különböző, és - mint a (3.1)-es képletből tudjuk - a húr alapharmonikusának hullámhossza a húr hosszának kétszerese. Ebből következik, hogy minél magasabb alaphfrekvenciájú egy húr, annál magasabb lesz a pickup átlagoló hatása miatti aluláteresztő szűrés vágási frekvenciája. A pickup tere, a pickuptól távolodva

gyengül, tehát minél rövidebb hullámhosszú egy felharmonikus, ez az átlagoló hatás annál jobban csillapítja. Nézzünk egy példát: Ha gitár A_2 húrjának hossza 65 cm és a pickup terének hossza 8 cm, akkor mekkora lesz a vágási frekvencia? A húr alapharmonikusa 110 Hz, hullámhossza 130 cm, mivel (3.1)-ből $\lambda_n = 2l/n$, ezért $7.65 \text{ cm} = 130 \text{ cm}/17$, az első harmonikus, melynek hullámhossza rövidebb a pickup terénél. Ez a húr alapharmonikusának 16-ik felharmonikusa, tehát (3.4) alapján $17 \times 110 = 1870 \text{ Hz}$ az első felharmonikus amit a pickup már csillapít. Az ennél magasabb frekvenciájú felharmonikusok egyre jobban csillapítottak, majd végül teljesen kiátlagolódnak

A másik jelenség a pickup deriváló hatása, amely azt jelenti, hogy a pickup kimenetén a nemlinearitást követően nem a húr kitérésétől, hanem a húr sebességétől függő elektromos jel lesz. Ezt a feltételezést méréseinkkel sikerült is igazolni (6.3.1.1 fejezet). A jelenség létét az elvégzett szimuláció is alátámasztotta, ahol a modell húrjában terjedő kitérést a kimenetre téve, ha a kimeneti jelet deriváltuk a kapott eredmény hangja sokkal élethűbb volt.

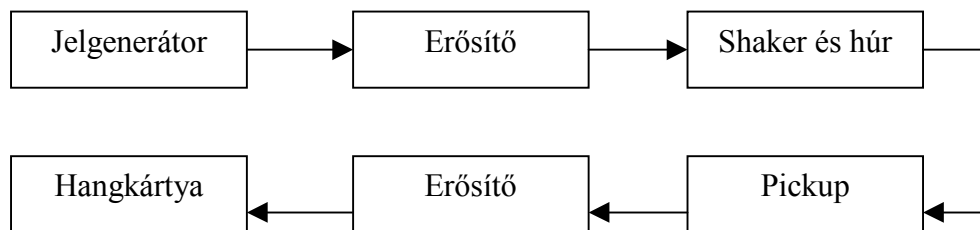
Mint látható a pickup kapcsán, a mérések során kiderült pár egyelőre feltáratlan dolog, amelyek ismerete a modellbe való implementáláshoz fontos, ezenkívül az előre már sejtett nemlinearitás mértékét és karakterisztikáját sem ismerjük, ezért elengedhetetlenek a pickup-pal kapcsolatos részletes mérések.

6.2 A pickup mérése

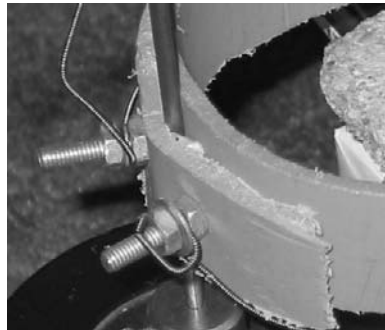
Elsődleges célunk a pickup nemlinearitásának felderítése, hogy a bementi jelhez képest a kimeneti jel hogyan torzul. Ennek a jelenségnek a vizsgálatához a valóságnak is megfelelő elrendezést választottuk, nevezetesen egy húrdarab mozgása szolgáltatja a pickup bemenetét, és a pickup tekercsének kimenetén megjelenő feszültség volt a kimenetünk. Ahhoz, hogy a nemlinearitás megismeréséhez közelebb jussunk, egy olyan gerjesztő jelre van szükségünk, amit ismerünk. Erre azért van szükség, hogy a kimeneti jelben megjelent torzulásokat fel tudjuk ismerni. Erre a célra a szinuszjel a legmegfelelőbb. Ha meg tudjuk oldani, hogy a pickup fölött rezgő húr kitérése tiszta szinusz legyen, akkor a mérés eredménye használható lesz. Mint látni fogjuk, a pickup mérése során ennek megoldása volt a legbonyolultabb feladat.

6.2.1 Az első mérési elrendezés

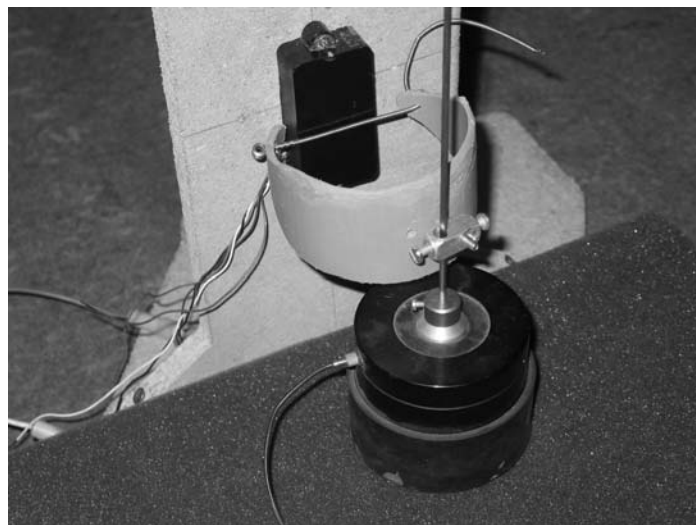
Első mérési kísérletünk eredménytelen volt, úgyhogy csak röviden ismertetem a mérési elrendezést. A mérés elve (6.5 ábra) a következő volt: a húr rezgetésére egy shaker-t használtunk, a shaker-re rögzítettünk egy fémpálcát, a fémpálcára rögzítettük a húrdarabot úgy, hogy egy félbevágott PVC csődarabra feszítettük (6.6 ábra). Ezt a szerkezetet helyeztük a stabilan rögzített pickup elé (6.7 ábra). A shaker bementére egy jelgenerátort kötöttünk, a pickup kimenetét pedig egy hangkártyára kötöttük, ahol a rögzített jeleket Matlab-bal analizáltuk.



6.5 ábra Az első mérési elrendezés



6.6 ábra A húr és a PVC cső rögzítése a fémpálcára



6.7 ábra A shaker, a húr és a pickup elhelyezkedése

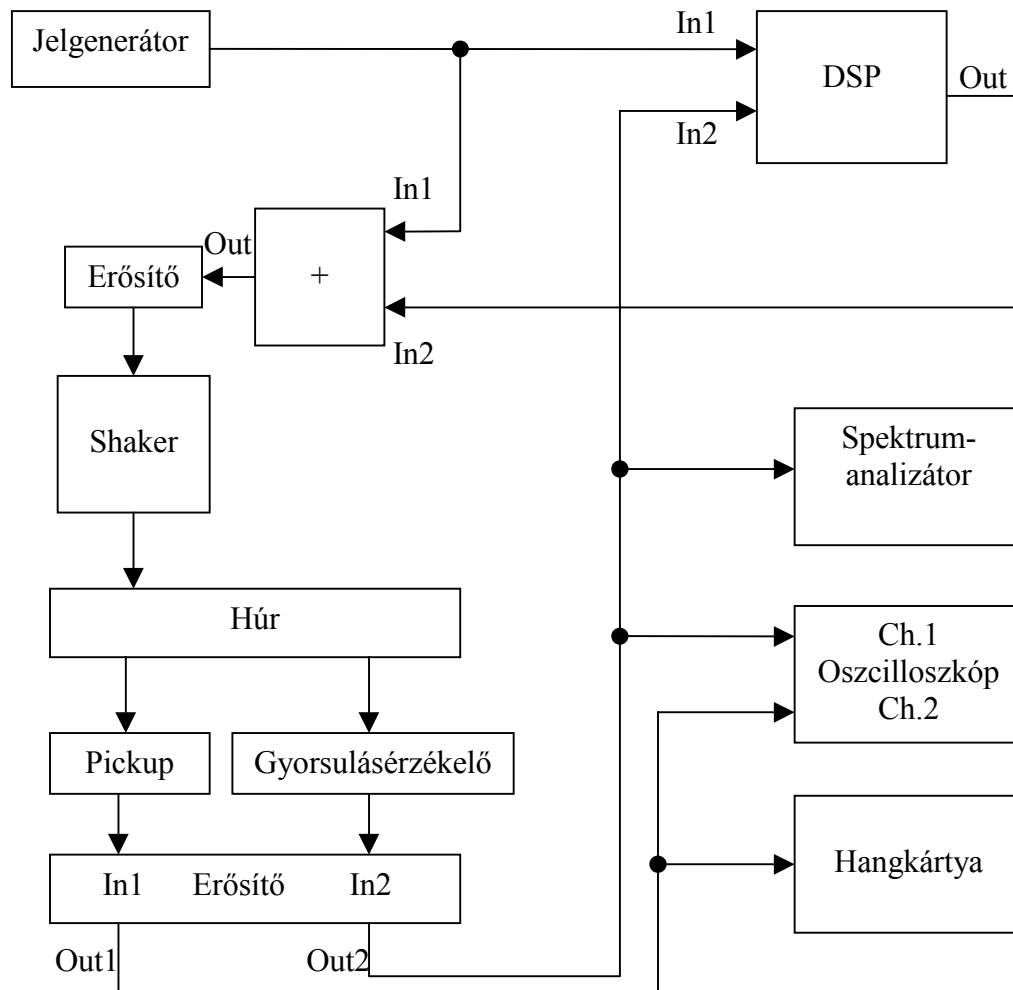
A mérési eredmények analízisakor értékelhetetlen eredményeket kaptunk. Ez azzal magyarázható, hogy az általunk felépített konstrukciónak vannak saját, nem kívánatos rezonanciái, és ezek megmásítják a mérési eredményeket. Probléma még az is, hogy nem tudhatjuk, hogy a húr a pickup fölött ténylegesen szinuszos mozgást végez-e. Mivel a rendszer rezonanciáival nem tudunk számolni, és a húr mozgását sem tudjuk pontosan meghatározni, kell találni egy másik mérési elrendezést, amely értékelhető eredményeket ad.

6.2.2 A második mérési elrendezés

A cél tehát az, hogy biztosítsuk azt, hogy a húr rezgése a pickup előtt szinuszos legyen. Ennek megoldására olyan elrendezést kellett kidolgozni, amelyben meg is tudunk bizonyosodni arról, hogy a bemeneti jel tényleg szinuszos. Ezt csak úgy lehet elérni, ha a húr mozgását a pickup előtt valamilyen módon, például egy gyorsulásérzékelővel megfigyeljük. Ha viszont a húrra erősítünk egy gyorsulásérzékelőt, akkor az módosítja a húr mozgását számunkra ismeretlen módon. Mindezeket a problémákat megoldja az alább ismertetendő mérési elrendezés (**6.8 ábra**).

A húr egy műanyag vonalzó darab alá lett rögzítve és kifeszítve, a mögé elhelyezett, vízszintes irányba lefektetett shaker-hez egy rugó segítségével lett csatolva. A vonalzót egy satu segítségével a pickup fölé helyeztük, úgy hogy a vonalzót egy rézlaphoz rögzítettük hajlékony műanyaglapocskákkal, hogy a rezgetés során a vonalzó egyenes tudjon maradni (**6.9 ábra**). A vonalzóra középtájt, a pickup fölé viasszal egy gyorsulásérzékelőt rögzítettünk. A gyorsulásérzékelőt és a jelgenerátort rákötöttük egy DSP kártyára. A DSP kártya kimenetét és a jelgenerátor jelét egy összegző áramkörre kötöttük, az összegző kimenetét pedig a shaker bemenetére. A DSP kártyán egy aktív zajszűrő algoritmus futott. A mérés azzal kezdődött, hogy a DSP kimenetén megjelenő jelsorozattal, a gyorsulásérzékelő kimenetű rendszer átviteli függvényét identifikáltuk. Ezek után a jelgenerátort is rákötöttük a DSP-re meg az összeadóra, és beállítottuk rajta azt a szinuszjelet, amivel a húrt szeretnénk volna rezgetni a pickup felett. Ekkor az aktív zajszűrő programot elindítva a DSP a kimenetén olyan jelet generált, amelyet a referenciajelhez hozzáadva és ezután a shaker-re kötve a gyorsulásérzékelőnél a húr az elérni kívánt szinuszos rezgést produkálta. A gyorsulásérzékelő és a pickup jelét a

megfigyelés érdekében oszcilloszkópra kötöttük, a pickup jelét a mérési eredmények rögzítéséhez rákötöttük egy számítógép hangkártyájára.

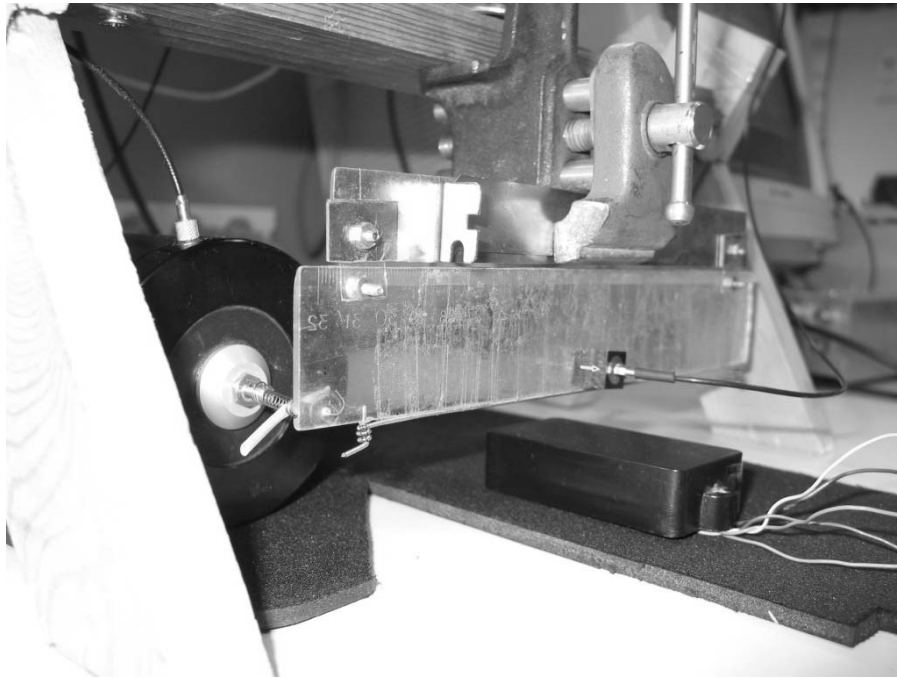


6.8 ábra A második mérési elrendezés

Megjegyzendő, hogy a rendszer eleinte a zajszűrő program indításakor mindig begerjedt. Ennek oka a shaker és a vonalzó csatolását megoldó rugó volt, ugyanis néhány frekvencián a rugó berezonált. Ezen rezonancia frekvenciák esetén a rugó füllel is hallható longitudinális rezgésbe kezdett. Ez pedig a rendszer átvitelének identifikálását olyan mértékben lerontotta, hogy a zajszűrő algoritmus nem tudott kielégítően működni. Ezért a rugóba egy puha műanyagdarabot (sárga) helyeztünk a longitudinális rezgés kiküszöbölésére.

A gyorsulásérzékelő jelét egy spektrumanalizátorra is rákötöttük, hogy a szabályozási kör hatását megfigyelhessük. Ha a szabályozó program aktív volt, akkor az analizátoron megjelenő spektrumban az első, és egyben legnagyobb amplitúdójú

felharmonikus szintje is több mint 50 decibellel kisebb volt, mint a szinusz alapharmonikusa. A rendszer működése a 20 Hz – 100 Hz tartományban volt stabil.



6.9 ábra A húr, a pickup, a shaker és a gyorsulásérzékelő

6.3 A pickup beillesztése a modellbe

A mérési eredményeinket egy számítógép hangkártyáján keresztül wave formátumban rögzítettük, majd a MatLab program segítségével analizáltuk. Amit biztosan tudunk, hogy a pickup fölött rezgő húr gyorsulása az általunk beállított frekvenciájú és amplitúdójú szinusz. Mivel a húr gyorsulása szinuszos, a sebessége és a kitérése is az. Ezt fontos tudnunk, mert a későbbiekben a pickup deriváló hatásának vizsgálatakor is, és pickup nemlinearitásának mérésekor is ezt az ismeretünket fel kell majd használnunk.

6.3.1 A mérés eredménye

6.3.1.1 A pickup deriváló hatása

A pickup deriváló hatását már korábban megsejtettük, méréseink folyamán ezt a sejtést megpróbáltuk igazolni. A jelenség igazolását a következő elv alapján próbáltuk meg: Legyen a húr kitérése A_1 . Ha a húr kitérése A_1 , akkor a sebessége $A_1\omega$ -val, a gyorsulása pedig $A_1\omega^2$ -nel arányos ω frekvencián. Ha a húr frekvenciáját a kétszeresére növeljük úgy, hogy közben a gyorsulást állandó szinten tartjuk, akkor a gyorsulásra és a sebességre az alább felírt összefüggések lesznek igazak:

$$A_1\omega^2 = A_2(2\omega)^2 = 4A_2\omega^2 \rightarrow A_2 = \frac{1}{4}A_1 \quad (6.1)$$

a sebesség ekkor:

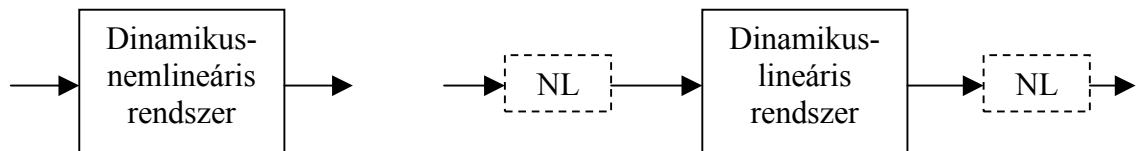
$$A_2 2\omega = \frac{1}{4} A_1 2\omega = \frac{1}{2} A_1 \omega \quad (6.2)$$

Ebből következik, hogyha a pickup kimenetének amplitúdója 2ω frekvencián a negyedére csökken az ω frekvencián mérthez képest, akkor a pickup kimenete kitérésfüggő, ha viszont csak a felére csökken, akkor a kimenet sebességfüggő, mivel a frekvenciaváltozás következtében, állandó gyorsulás mellett a húr sebessége a felére, kitérése a negyedére csökken.

Több egyszerű mérés alapján, ahol a méréseket kis amplitúdó mellett végeztük, hogy a pickup nemlinearitását kiküszöböljük, és így biztosítsuk a szinuszos be- és kimeneti jelet, a pickup kimenete sebességfüggő, mivel a frekvencia kétszerezésére a pickup kimeneti jele a felére csökkent. Tehát a feltételezett deriváló hatás létezik. Ez azért lényeges, mert szintézismodellünkben a húrt reprezentáló késleltetővonalban kitérésértékek „utaznak”, ezért a pickup deriváló hatását mindenképpen figyelembe kell venni.

6.1.1.1 A pickup nemlinearitása

A pickup egy dinamikus rendszer, amely tartalmaz nemlinearitást. Ennek a nemlinearitásnak a felderítése volt a pickup mérésének elsődleges célja, hogy aztán a kapott eredmények alapján felépített pickup-modellt beilleszthessük a szintézisbe. A kérdés az, hogy egy dinamikus-nemlineáris rendszerrel van-e dolgunk, vagy pedig a pickup felbontható egy lineáris, dinamikus és egy statikus nemlinearitást tartalmazó blokkra (6.10 ábra). Megvalósítás szempontjából könnyebbé teszi, ha a nemlinearitás statikus. Ha a nemlinearitás a dinamikus rendszer része, akkor további megfontolásokat kell tenni, arról, hogy a megvalósítás szempontjából kell-e egyszerűsítéseket tenni, illetve ha kell, akkor milyeneket.

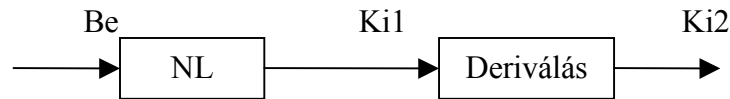


6.10 ábra Dinamikus és statikus nemlinearitás

Többféle mérést végeztünk. Három különböző pickup-ot vizsgáltunk meg (egy DiMarzio humbucker pickup-ot, és két különböző, Fibenare márkájú pickup-ot). A méréseket elvégeztük többféle helyzetben, különböző távolságokra a húrtól (1mm, 5mm és 1cm), a pickup széléhez közel és a közepén is. A DiMarzio pickup-ban 6 mágnes volt, mindegyik húrhoz egy. Megfigyeltük a nemlinearitást úgy, ha a húr a mágnes fölött volt, illetve, ha két mágnes kötött volt. Ezekhez a mérésekhez a húr amplitúdóját amennyire csak lehetett megnöveltük (ez körülbelül 3-4 mm-es kitérést jelent), mivel elgondolásunk szerint a pickup nemlinearitása főleg nagy kitéréseknél jelentkezik.

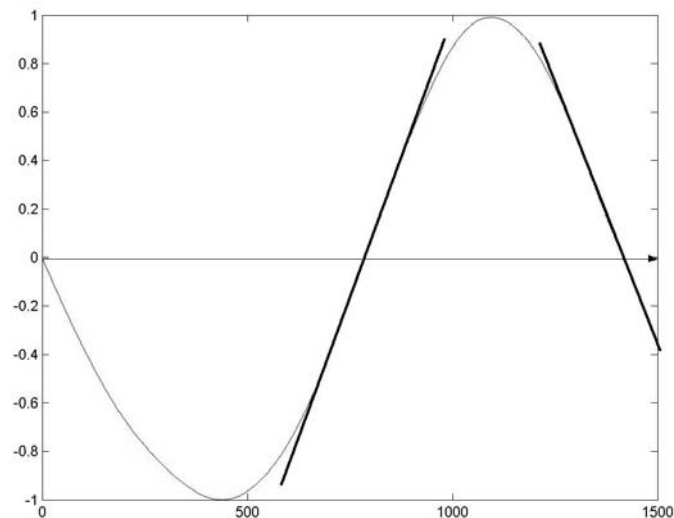
Kiindulási alapunk, hogy tisztában vagyunk a bemeneti szinusz jelünk frekvenciájával. A nemlinearitást a bemenet-kimenet függvénnyel szeretnénk leírni. Ennek érdekében egy olyan amplitúdójú referencia szinuszt kell létrehoznunk MatLab-ban, amely bemenetként szolgálhatott. Ehhez előbb át kell gondolnunk a szinusz függvény egy sajátosságát. A szinusz függvény meredeksége a nullátmeneteknél megegyezik a deriváltjának (azaz a kiindulási függvényünknek) a helyi szélsőértékével. Ennek ismeretében már ki tudjuk számolni az összehasonlításához szükséges referencia szinusz amplitúdóját a következőképpen: Vesszük az eredeti jel integráltját, és képezzük

az összes periódus átlagát, hogy a mérés esetleges zajait kiküszöböljük. Az integrálásra a pickup deriváló hatása miatt van szükség, mivel nekünk csak a pickup kimenetéről vett Ki_2 , derivált jel áll rendelkezésünkre (**6.11 ábra**). Minket viszont a Ki_1 és a Be közötti kapcsolat érdekel, így a kimeneti jel integráltjára van szükségünk.



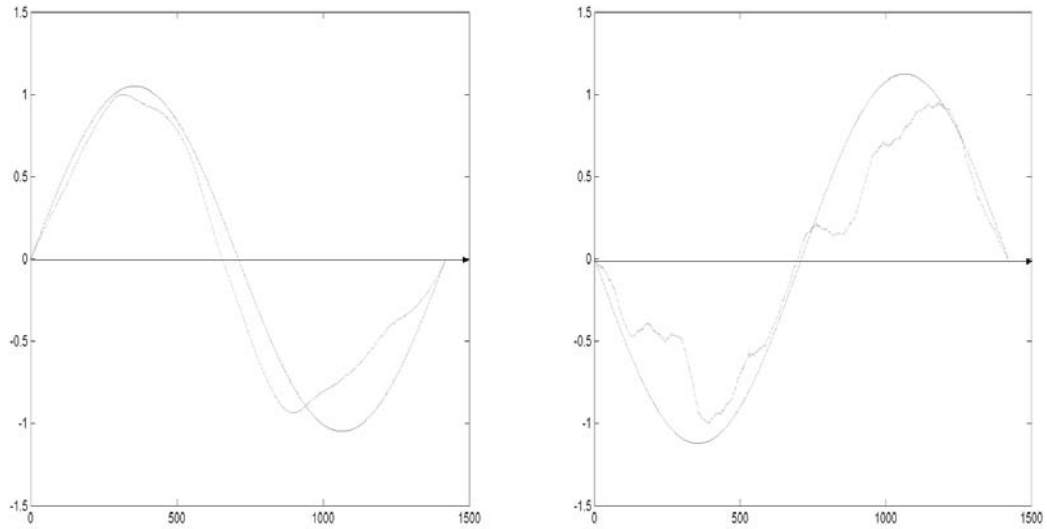
6.11 ábra A pickup nemlinearitása és deriváló hatása

Ennek az integrálfüggvénynek a meredeksége a nullátmeneteinél (**6.12 ábra**) megegyezik a majdani referencia szinusznak amplitúdójával. A meredekség számításához használt szinusz ugyan mérés eredménye, és mivel a pickup kimenete, ezért torzított is, de az átlagolások következtében a valósághoz mégis így járunk legközelebb. A frekvenciáját pedig ismerjük.



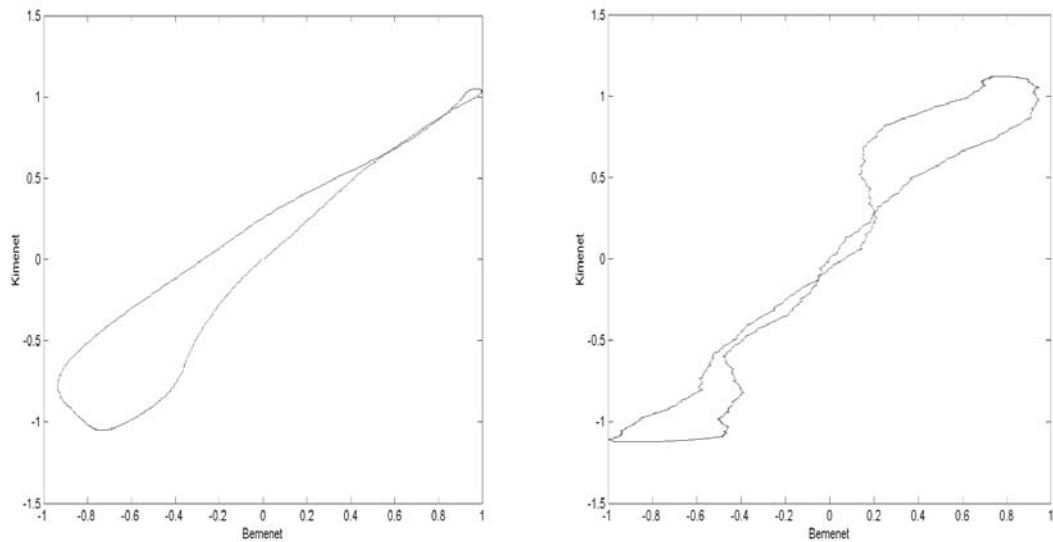
6.12 ábra Az átlagolt integrálfüggvény meredekségei

Az így kapott referencia szinusz lényegében megegyezik a bemeneti szinuszjelünkkel. A bemeneti és a kimeneti jelet összehasonlítva jól látható, hogy a pickup nemlineáris (**6.13 ábra**).



6.13 ábra A referencia szinusz (piros) és a pickup kimenete (kék), két különböző pickup-nál

A nemlinearitással kapcsolatos eredményünket a szintézisbe a pickup bemenetének és kimenetének kapcsolatával írjuk le (**6.14 ábra**).



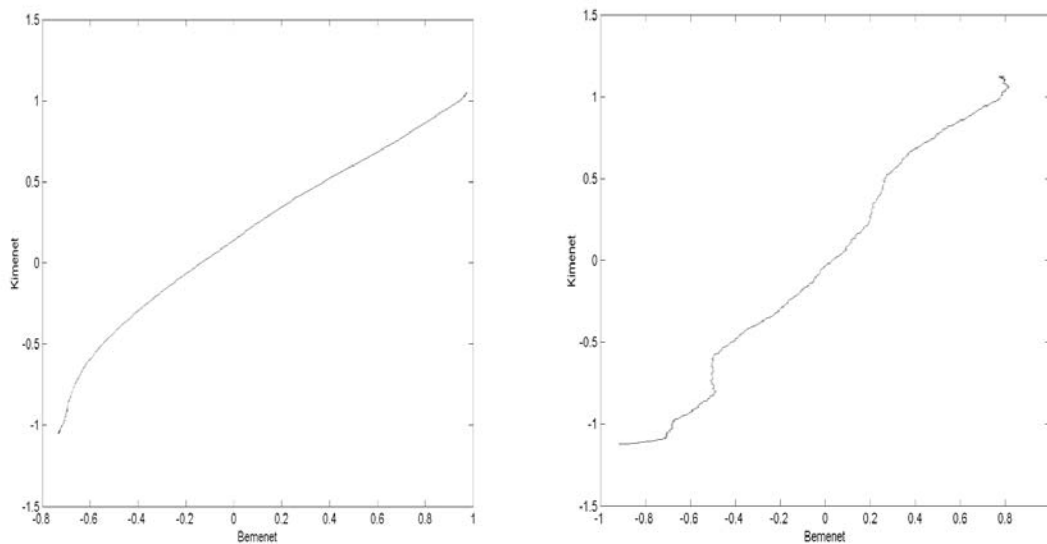
6.14 ábra A pickup bemenetének és kimenetének kapcsolata, két különböző pickup-nál

Mint látható, a nemlinearitás dinamikus, a kapcsolat hiszterézist tartalmaz. Ennek megvalósítása nehezebb, mert modellezéséhez a rendszer átvitelének pontos ismeretére lenne szükség, ezért meg kell vizsgálni milyen egyszerűsítésekkel élhetünk.

6.3.2 Megvalósítás, és a szükséges egyszerűsítések

A dinamikus nemlinearitás megvalósításához a rendszer részletes identifikációjára lett volna szükség, és ehhez a körülmények nem voltak adottak, ezért és az implementálás bonyolultsága miatt szintézisünkbe egyszerűbb nemlinearitás-modellt kell alkotni. A választott megoldásnak ugyanakkor minél jobban közelítenie kell a mérési eredményekből kapott átvitelhez.

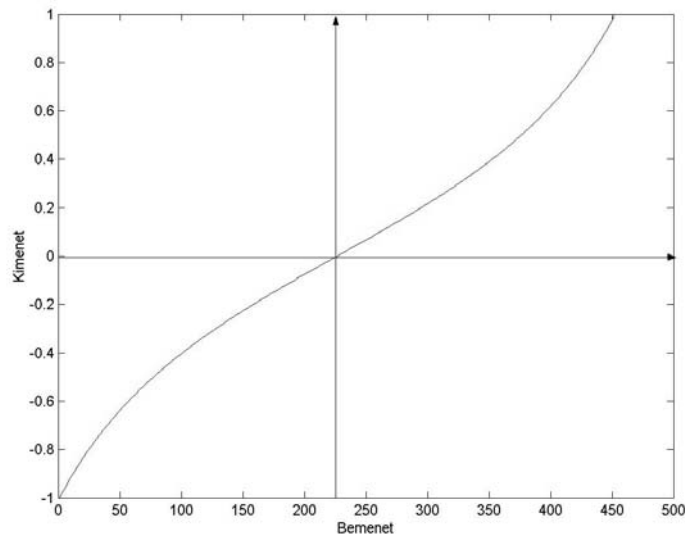
A megoldás egy olyan statikus karakterisztika, melynek pontjai az adott bemeneti értékekhez tartozó két kimeneti érték átlagai. Másképpen, a megvalósítandó statikus karakterisztika a hiszterézis középvonala (**6.15 ábra**).



6.15 ábra A hiszterézis középvonala, két különböző pickup-nál

Mint az ábrán látható, a pickup átvitele kis kitéréseknél nagyjából lineáris, jelentősebb nemlinearitás csak nagyobb kitéréseknél tapasztalható. Ez egybevág azzal, amit a pickup nemlinearitásáról, a mérés megkezdése előtt sejtettünk. Az implementálás során olyan ismert, és ezért DSP-n könnyebben megvalósítható görbét kerestünk, amely a legjobban hasonlít a fenti ábrán látotthoz. A tangens függvény -1 rad - $+1$ rad

szakasza éppen megfelel céljainknak (6.16 ábra). Tehát a pickup modelljének megvalósításakor, a nemlinearitást ezzel a függvénnyel modellezzük.



6.16 ábra A megvalósítandó nemlinearitás

Ez azt jelenti, hogy a pickup a mágnesek fölötti tartományban, a homogénebb mágneses tér következtében nagyjából lineárisan működik, a mágnesektől távolabb azonban, ahol a tér kevésbé homogén, a ritkuló erővonalak miatt a nemlinearitás mértéke, és így az indukált feszültség is nagyobb.

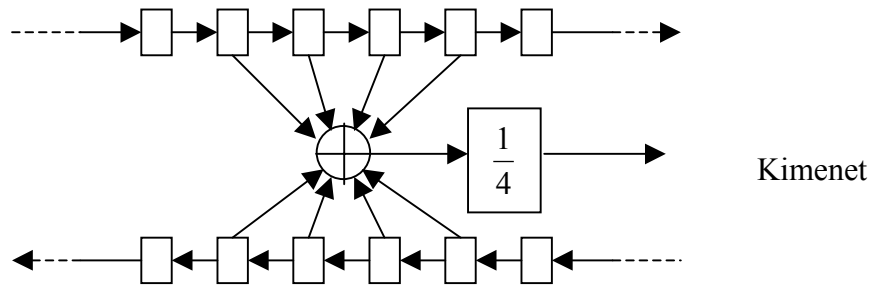
Ez a megvalósítás valószínűleg túl sok közelítést tartalmaz, és a mérési eredmények analizálása során elkövetett pontatlanságok miatt is a pickup nemlinearitásának további vizsgálatára lesz majd szükség a későbbiekben, a valósághoz közelebb álló modell megalkotásának érdekében.

A pickup-ot meghatározó második jelenség a deriváló hatás. Ennek megvalósítása diszkrét idejű szintézisünkben egy egyszerű deriváló tag:

$$H_{diff}(z) = 1 - z^{-1} \quad (6.3)$$

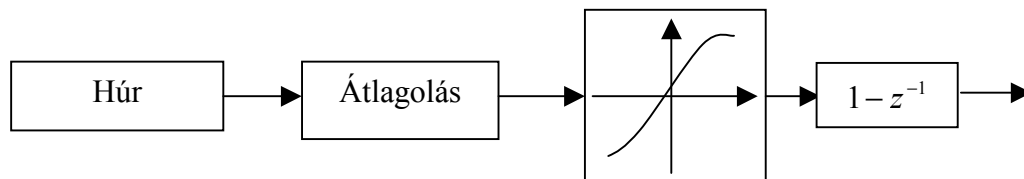
A harmadik jelenség, amit a pickup mérése közben tapasztaltunk, a pickup átlagoló hatása. Ennek megvalósítása is bonyolult lenne, ha figyelembe vennénk, hogy a pickup mágneses tere fokozatosan gyengül a pickup-tól távolodva. Emiatt a megvalósítás során úgy tekintjük, hogy a pickup tere, ameddig tart, egyforma erősségű. Ebben az esetben

elég, ha a húrt reprezentáló késleltetővonalból a pickup-ba jövő jel nem egy, hanem több késleltetőből vett érték átlaga (**6.17 ábra**). Az, hogy hány késleltetőből átlagoljunk a húr hossza, és a pickup terének hossza határozza meg. Például 440Hz-es hanghoz 44.1kHz-es mintavételi frekvenciánál 100 darab késleltető kell, ha a húrunk 50cm hosszú, és a pickup terének hossza 5cm, akkor 10 késleltetőt kell átlagolni.



6.17 ábra Az átlagoló hatás megvalósításának egy esete

Tehát az implementálandó pickup modellünk összes eleme adott. Ezek összekapcsolásából adódik a DSP processzoron megvalósítandó elrendezés (**6.18 ábra**).



6.18 ábra A megvalósítandó pickup-modell

Először a húron terjedő hullámok hullámhosszától, és a pickup terének méretéből adódó átlagoló hatás érvényesül, majd a húr kitérése okozta mágneses fluxus-változás nemlinearitása torzítja a jelet, végül a pickup-ot jellemző deriváló hatás érvényesül.

7. A valós idejű szintézis

7.1 A megvalósítás eszköze

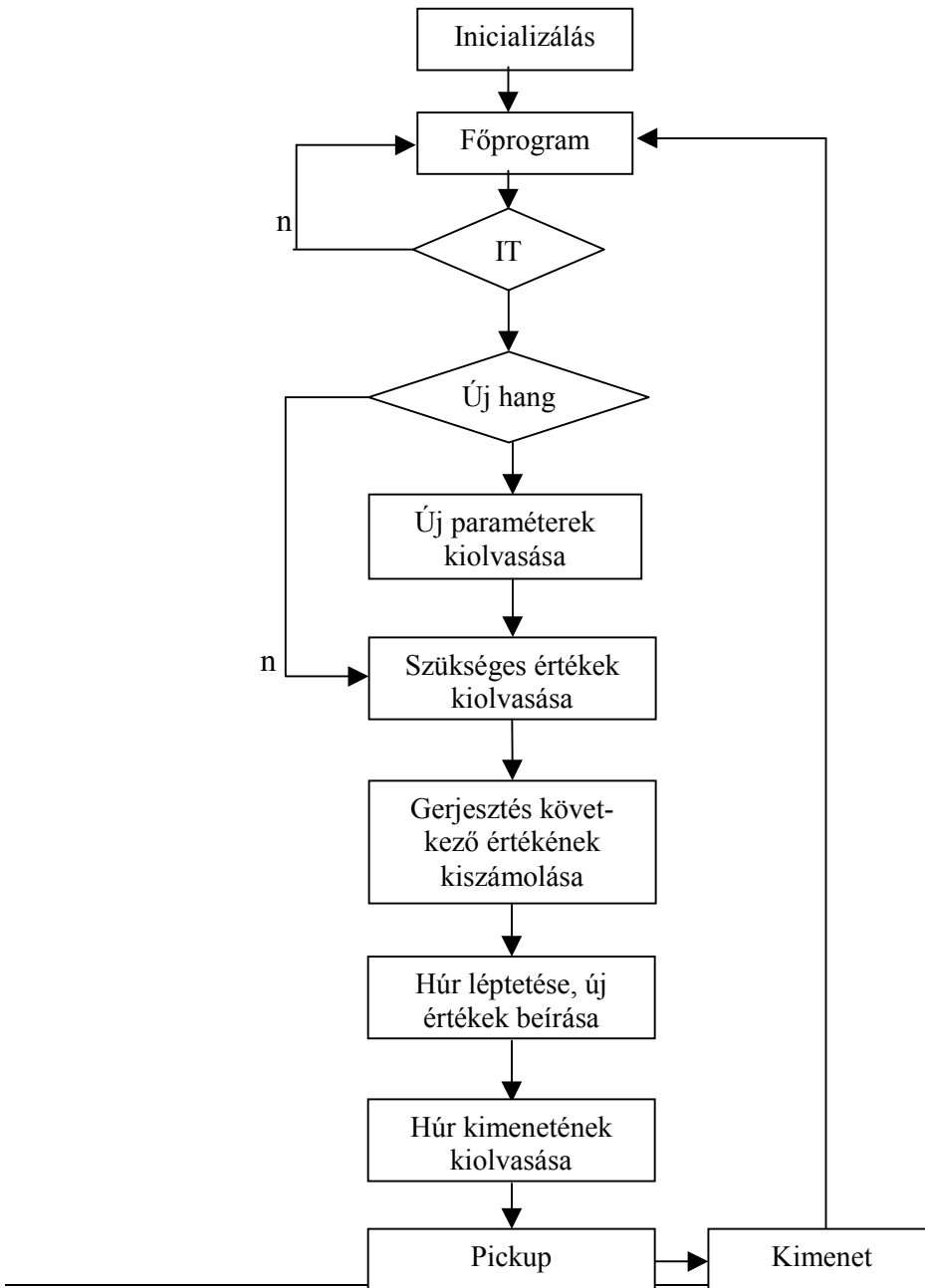
A megvalósításhoz olyan eszközt kell találnunk, amely olcsó és könnyen hozzáférhető. Fontos szempont a beágyazhatóság komplexebb rendszerekbe. A szintézis valós idejű megvalósításához olyan processzor kell, amely sok aritmetikai műveletet tud elvégezni rövid idő alatt, mivel a fizikai modellnek nagy a számításigénye. Erre a célra egy fixpontos DSP processzor megfelelő. Alacsony ára mellett a fejlesztői környezet is egyszerű, és számítási kapacitása is elegendő. Arra az esetre, ha a fixpontos processzorra elkészített gitárszintézist egy komplexebb szintetizátorba be szeretnénk illeszteni, részegységként a fixpontos processzoron való megvalósítás megfelelő, egy többprocesszoros rendszerbe is könnyen beilleszthető. Megvalósítható lenne a szintézis lebegőpontos processzoron is, de ez a megoldás nem biztosít a fixpontosnál gyorsabb működést, viszont jóval drágább.

A konkrét megvalósításhoz egy Analog Devices DSP 2181-es processzort használtunk. A processzor 16 bites, 33 MHz-es, fixpontos számábrázolású. Adat- és programmemóriája egyaránt 16-16 kszó. Három műveletvégző egységgel rendelkezik, ezek a shifter, az összeadó-logikai és a szorzó-összeadó egység. A shifternek két 16 bites kimeneti regisztere (sr1, sr0) van. Az összeadó egységnek két bemeneti regiszterpárja van (ax0, ay0 és ax1, ay1), kimenete egy 16 bites regiszter (ar). A szorzó egység ugyanígy két bementi regiszterpárral rendelkezik (mx0, my0 és mx1, my1), kimenete egy 8 bites és két 16 bites regiszterből áll (mr2, mr1, mr0) [Analog1995].

A processzor számábrázolása miatt, és mert előjeles törtszámábrázolást használtunk, a teljes ábrázolható tartomány -1 -től $1-2^{-15}$ -ig tart. A 16 bites szóhossz pedig így 10^{-4} -es maximális felbontást tesz lehetővé. Ez, mint majd később látni fogjuk, a megvalósítandó modell implementálásához kevés volt a megvalósítandó paraméterek és a számolások szükséges pontossága miatt. Emiatt áttértünk a duplapontos számábrázolásra és a duplapontos műveletek használatára, ami már 10^{-8} -os felbontást biztosít. Ez a felbontás már mindenképpen elegendő.

A DSP kártya a processzoron kívül tartalmaz egy AD1847-es sztereó AD-DA átalakítót, amely 16 bites, és delta-sigma modulációs elven működik. A bemenetek és a kimenetek AC csatoltak. A szintézis megvalósításához 44.1 kHz-es mintavételi frekvenciát választottunk, és minden egyes mintavételt interrupt-ként értelmeztünk, tehát a DSP-re írt program törzse, az inicializálás után, minden mintavétel után lefutott. Ez annyit jelent, hogy mintavételenként $33 \text{ MHz}/44.1 \text{ kHz} = 738.3$ utasítás végezhető el. Ez az utasításszám elégnek bizonyult.

7.2 A megvalósított modell



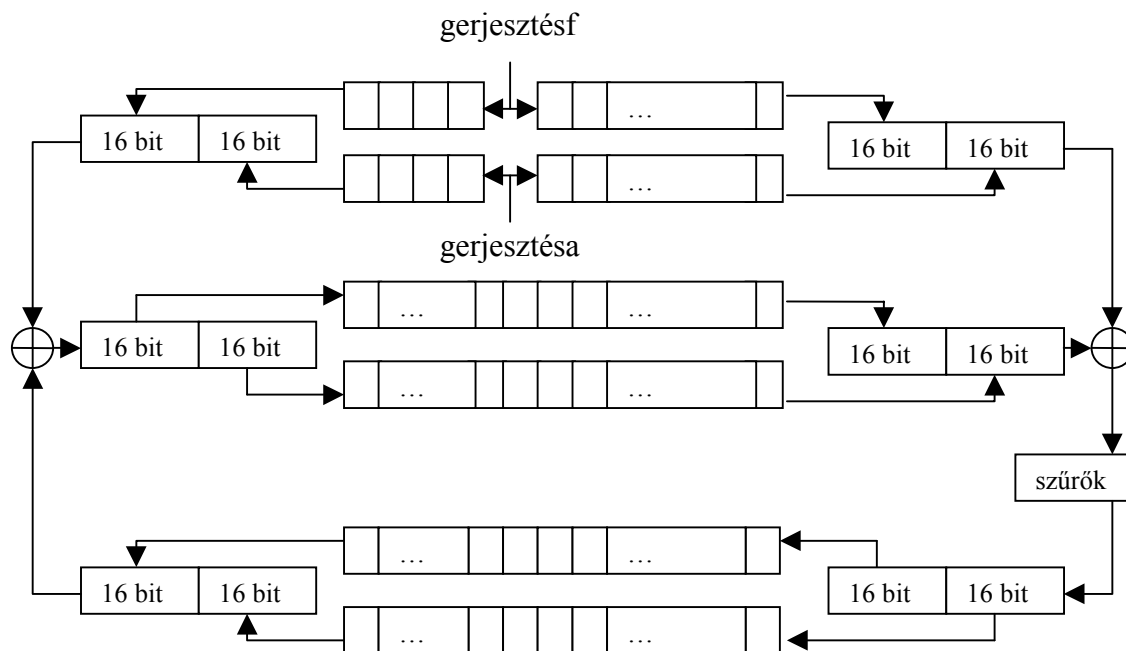
7.1 ábra A megvalósított program szerkezete

7.2.1 A húr és a gerjesztés megvalósítása

A gerjesztést a programban az (5.9)-es képlet alapján valósítottuk meg. A húr és a gerjesztővonal szükséges értékeit, az ezeket reprezentáló cirkuláris bufferekből olvassuk ki, a $c_1 - c_5$ paramétereket a MatLab-ban megírt gerjesztés-szimulációval számoljuk ki, és konstansként adjuk meg. A húrt kitérítő erőt az inicializáció során egy buffer-be töltjük, amiből minden egyes alkalommal kiolvassuk a szükséges értéket. Ezek alapján minden ciklusban kiszámoljuk a gerjesztés következő értékét, amit a gerjesztővonalba írunk be.

A húr megvalósításához a 4.3 ábrán látható modellt vettük alapul. A cirkuláris buffer-eket és a pointereket is ennek megfelelően alakítottuk ki, így ebben a húrmodellben 16 biten ábrázolt értékek „utaztak”. Viszont kiderült közben, hogy a gerjesztés kiszámolásához használt összetevők szélesebb értéktartományban mozognak, mint amit a 16 bites felbontás lehetővé tesz, még hogyha a húrba betöltendő értékek a szimuláció alapján be is fértek volna ebbe a tartományba. Ennek kiküszöbölésére a gerjesztővonalba betöltendő értékeket leosztottuk. Így, mivel a húrba került értékek jóval kisebbek lettek, a gerjesztés kiszámolásához használt összetevők is a használható értéktartományon belülre estek. A húr kimenetét pedig a kimenetre tétel előtt felszoroztunk ugyanazzal az értékkel, amivel a beírásnál leosztottunk. Az ennek eredményeképpen kapott hang viszont a kis számokkal való sok műveletvégzés következtében keletkező kerekítési hibák miatt természetellenes lecsengésű lett, és a felszorzással az ezen hibák miatt keletkező zajt is hallható szintre erősítettük. Mindezek a problémák kiküszöbölésére létre kellett hozni a 32 bites húrmodellt (**7.2 ábra**), ahol az összes szám és művelet duplapontos. A gerjesztés felső (gerjesztésf) és alsó (gerjesztésa) 16 bitjét két különböző cirkuláris buffer-be töltjük, és a húrt reprezentáló összes késleltetővonalból is kettő van az alsó és felső bitek számára. A késleltetővonalak végén, és bármely más helyen, ahol a húrban és a gerjesztővonalban lévő adatokra szükség van, mindkét buffer-ből (egy késleltetővonalat két cirkuláris buffer valósít meg) kiolvassuk, és az így keletkező 32 bites számmal végezzük a

duplapontos műveleteket. Az így létrehozott modellben már nem okoznak problémát a kerekítési hibák, hiszen a nekünk fontos nagyságrendbe felszorozott kimenet értéke nem változik a kerekítési hibáktól.



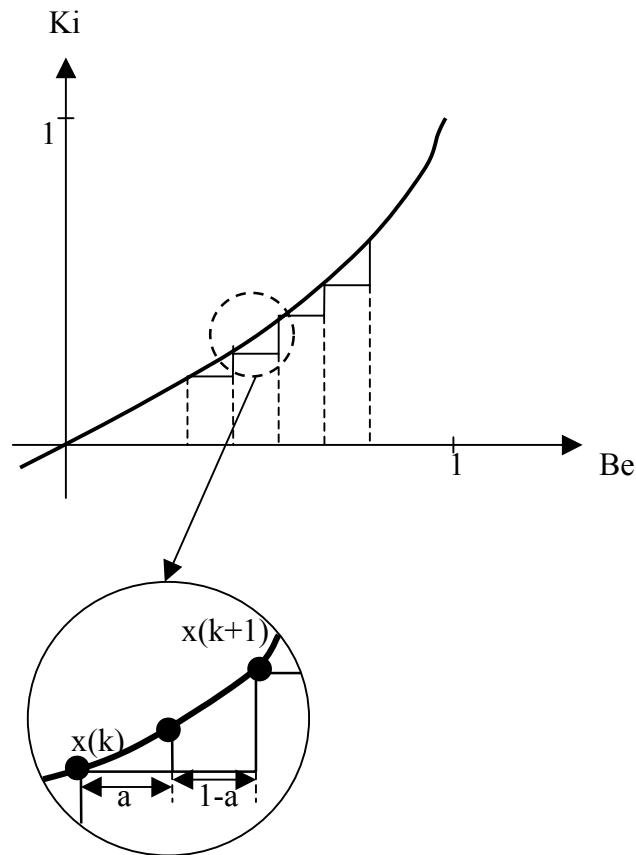
7.2 ábra A 32 bites húrmodell

7.2.2 A pickup megvalósítása

A pickup-ot meghatározó nemlinearitást a 6.14 ábrán látható függvénnyel szeretnénk megvalósítani. Ehhez a függvényt 8 bites kvantálásnak vetjük alá, azaz 256 egymástól egyenlő távolságban lévő függvényértékre bontjuk fel (7.3 ábra). A kapott értékeket egy táblázatban tároljuk el a DSP memóriájában. A húrból jövő 32 bites számnak vesszük a felső 16 bitjét, mert a kártya kimenete csak 16 bites. A szám felső nyolc bitjét használjuk a táblázatban való címzéshez, ehhez a felső nyolc bitet el kell shiftelni az alsó nyolc helyiértékre, majd az így kapott címen lévő értéket kiolvassuk a táblázatból. Ez a nyolc bites felbontás azonban nem elég, úgyhogy a húr 16 bites kimenetének alsó nyolc bitjének segítségével a kártya kimenetére kerülő értéket lineáris interpolációval kapjuk meg. Ennek eléréséhez kiolvassuk a táblázatban a következő helyen lévő értéket is. Az alsó nyolc bitet elshifteljük a felső nyolc helyiértékre, így megkapjuk az

interpolációhoz szükséges a számot. Az interpolált értéket a következő összefüggés adja meg:

$$y_{ip} = ax(k+1) + (1-a)x(k) \quad (7.1)$$



7.3 ábra A nemlinearitás „kvantálása” és az interpoláció

Az így kapott kimenetet már csak deriválni kell, a pickup deriváló hatása miatt. Ennek megvalósítása (6.3) alapján, egy egyszerű FIR szűrővel lehetséges. A szűrő 16 bites kimenete lesz a kártya kimenete is.

7.2.3 A megvalósított modell vezérlése, dallamjátászás

A programban megvalósított modell vezérlése több problémát is felvet. Minden egyes új hanghoz ugyanis más paraméterek tartoznak. Különböző veszteségi szűrő és törtrészkesleltető, különböző hanghossz és hangmagasság. A hangmagasság

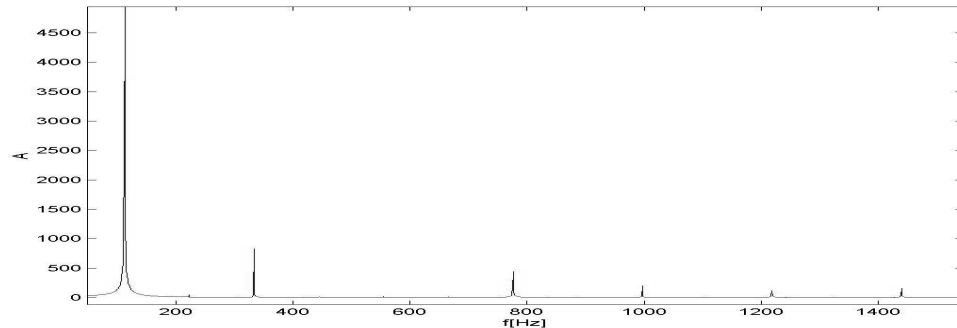
megváltoztatásához a húrt megvalósító késleltetővonalak hosszát is meg kell változtatni, és az új húrhosszhoz a húr különböző be- és kimeneti pontjait jelölő pointereket is át kell helyezni. A húr paraméterein kívül a gerjesztés paraméterei is változhatnak pengetésenként.

A problémák megoldásaként egy mintavételenként csökkenő változót vezettünk be, amely így a megszólaló hang hosszáért is felelős lett. Ha a változó értéke elérte a nullát, akkor lefutattuk a paramétereket megváltoztató ágát a programnak. A dallam lejátszásához szükséges összes paramétert az inicializálás folyamán betöltöttük egy cirkuláris buffer-be és a legmélyebb megszólaltatni kívánt hanghoz tartozó memóriamennyiséget is lefoglaltuk. Ebből a paraméterbufferből olvastuk ki a szükséges paraméterek értékét, amely a következő megszólaló hang hosszát is beállította. Új hang esetén, a húr hosszának hirtelen változása miatt a hangban nagy tranziens keletkezett, a buffer-ek kiürítése új hang esetén, azonban nem volt megoldható, mert a bufferek hossza miatt nem fért volna bele a megengedett utasításszámba, ezen kívül ez a megoldás a valóságnak sem felel meg. A tranziens kiküszöbölésére ezért egy a húrba bekapcsolt konstans csillapítást használtunk, mely csak a hang vége előtt néhány milliszekundummal aktiválódik, ezzel a húrban lévő kitérést olyan kicsire csökkenti, hogy a húr hosszának változása miatti tranziens nem halljuk.

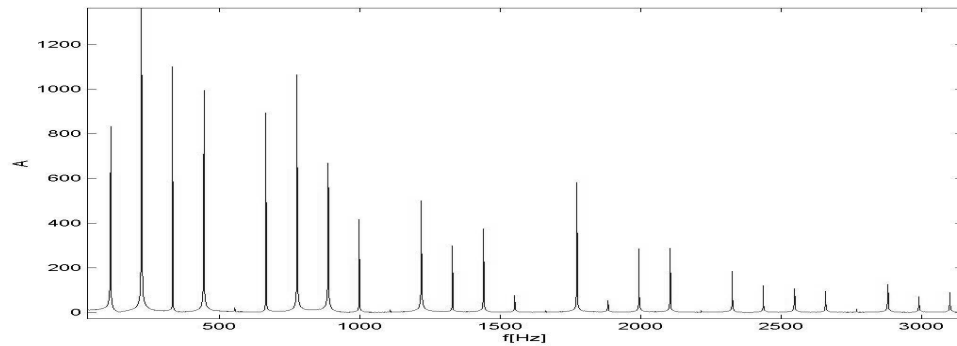
A megvalósítás során folyamatosan ügyelni kellett az utasításszám alakulására, mivel a használt mintavételi frekvencia miatt maximum 748 utasítás fért bele egy megszakításba. A számítások pontossága, és a paraméterek értékeinek széles skálája miatt a teljes szintézist 32 bites aritmetikával kellett megoldani, mert a 16 bit kevésnek bizonyult. Ennek megvalósítása a 16 bites processzoron jelentősen megnövelte a futási időt és az utasításszámot. Emiatt a polifónia megvalósítása is nehézségekbe ütközne. Az utasításszám csökkentésére át kellene gondolni, hogy mindenhol szükséges-e a 32 bites számolás, illetve, hogy az alkalmazott számításoknál hol lehetne „spórolni” az utasítások számával. Meggondolandó lehetőség a szintézis megvalósítása egy 24 bites, fixpontos DSP processzoron, mivel a 24 bites aritmetika által biztosított pontosság valószínűleg elegendő lenne, ezzel az utasításszámot jelentősen csökkenteni lehetne, és a polifónia is megvalósítható lenne.

7.2.4 Eredmények

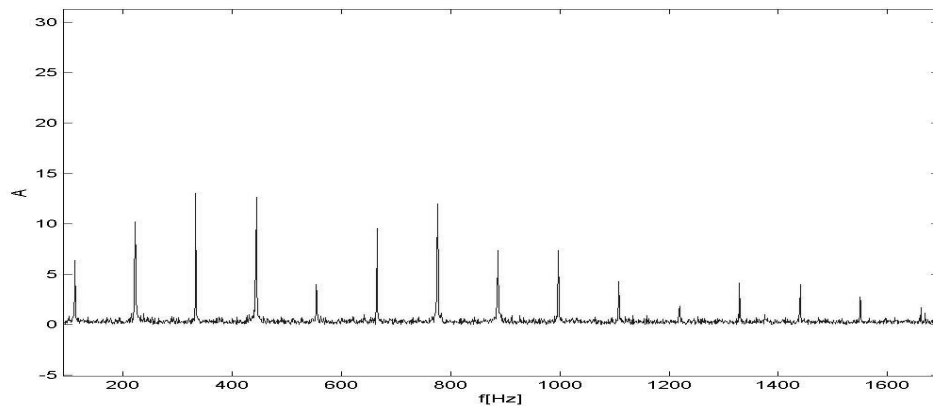
Ebben az alfejezetben néhány, a DSP által generált hang spektruma található. Látható, hogy 16 bites waveguide esetén kevés felharmonikus keletkezik (**7.4 ábra**), 32 bites waveguide esetén viszont sok (**7.5 ábra**), a deriválás pedig kiemeli a magasabb frekvenciás felharmonikusak, az alacsonyabb frekvenciásokhoz képest (**7.6 ábra**).



7.4 ábra A hang (110 Hz), 16 bites waveguide



7.5 ábra A hang (110 Hz), 32 bites waveguide



7.6 ábra A hang (110 Hz), 32 bites waveguide és a pickup deriváló hatása

8. Értékelés, továbbfejlesztési lehetőségek

Célunk az elektromos gitár egy olyan szintézisének a kialakítása és megvalósítása volt, amely a gitár fizikai működését modellezve a játéktechnikának megfelelően szabadon paraméterevezhető. A megoldáshoz modell alapú szintézist választottunk, melyet egy 16 bites fixpontos DSP processzoron valósítottunk meg. A modell paramétereinek megállapításához többféle mérésre is szükség volt. A mérések folyamán meg kellett állapítani a gitár húrjainak lecsengési állandóit, és fel kellett deríteni a pickup működési mechanizmusát. A mérési eredmények ismeretében, a modell megalkotása után, a modell működőképességének megállapítására MatLab-ban elkészítettük a szintézis szimulációját. Az eredmények megfeleltek elvárásainknak. A mérések után, a DSP processzoron való megvalósítás során több megoldandó problémával is találkoztunk, mint például a 16 bites aritmetika által biztosított pontosság elégtelensége.

A megvalósított szintézis modell alapú, ami azt jelenti, hogy ugyan a hangszer fizikai működéséből indultunk ki, de a modell megalkotása közben a konkrét fizikai működést csak olyan mélységig vizsgáljuk meg, amennyire a modell élethűségének biztosításához feltétlenül szükséges.

A húr lecsengési állandói alapján tervezett egypólusú veszteségi szűrők kielégítően adják vissza az elektromos gitárra jellemző lecsengést. Meggondolandó azonban, hogy a mérési eredmények alapján, több esetben is voltak olyan felharmonikusok (általában az első felharmonikus), amelyeknek lecsengési ideje nagyobb volt, mint az alapharmonikusé. Ennek a jelenségnek a megvalósítására az egypólusú veszteségi szűrő nem alkalmas, mert ebben az esetben a szűrő karakterisztikájában kiemelésre lenne szükség. Meg kell vizsgálni, hogy a jelenség figyelembevételével, például két- vagy háropólusú veszteségi szűrővel javítható-e a lecsengések élethűsége.

A pickup mérése során két olyan jelenségre lettünk figyelmesek, melyekre a szakirodalomban nem találtunk utalást. Ezek a pickup deriváló és átlagoló hatása. A két jelenség létezését méréseink igazolták. A jelenségek a diplomában tárgyaltnál pontosabb ismeretéhez további mérések szükségesek. A pickup, méréseink alapján egy nemlineáris dinamikus rendszer. Az általunk megvalósított nemlinearitás-modell

alapján (hiszterézis középvonala) a nemlinearitás kis mértékű, ezért modellünkben a pickup lineáris rendszerként is megvalósítható. Mindazonáltal a dinamikus nemlinearitás részletes identifikációja lenne szükséges a pickup nemlinearitásának valóságos megvalósításához.

A DSP-n való megvalósítás során a legnagyobb problémát az okozta, hogy a 16 bites fixpontos aritmetika nem rendelkezett elegendő nagyságú dinamikatartománnyal a modell paramétereinek befogadására. Emiatt, amikor a paramétereket a processzornak megfelelő értéktartományra normáltuk, keletkeztek olyan kis és nagy értékű paraméterek, amelyek hatására a modell vagy begerjedt, vagy a kerekítési hibák következtében a szintézis élethűségének romlásához vezettek. A problémák kiküszöbölése végett át kellett térni duplapontos aritmetikára, és 32 bites paraméterekre. Az ez által biztosított értéktartomány már elégnek bizonyult, viszont ennek következtében a szükséges utasításszám drasztikusan megnövekedett. Az utasításszám növekedése olyan mértékű volt, hogy a polifónia megvalósítása nem volt lehetséges. Az utasításszám csökkentésének érdekében megfontolásokat kell tenni, hogy mely számítások igénylik feltétlenül a duplapontos megvalósítást, de a gitárhoz szükséges hatodfokú polifónia megvalósítása egy processzoron nem lehetséges. Megoldás lehet a szintézis megvalósítása egy 24 bites, fixpontos processzoron, melynek dinamikatartománya valószínűleg elég nagy ahhoz, hogy ne legyen szükség a duplapontos aritmetika használatára. Megfontolható a megvalósítás egy drágább, lebegőpontos processzoron, ha figyelembe vesszük, hogy a hatodfokú polifónia megvalósításához biztos, hogy több fixpontos DSP-re lenne szükség, és így az árkülönbség nem lenne meghatározó szempont.

A szintézis megvalósítása során tapasztalatokat szereztünk az általános waveguide struktúra megvalósíthatóságáról 16 bites, fixpontos processzoron. A tanulság az, hogy még a legegyszerűbb megvalósított waveguide struktúra esetén is kevés volt a processzor 16 bites szóhossza, ezért ilyen szintézis megvalósításakor 24 bites, fixpontos processzor használatát javasoljuk.

Függelék

1. A mérésekhez használt műszerek

1.1 A húr mérése

- Előerősítő
- BK 4399 gyorsulásérzékelő
- ARIEL Model 656 audio erősítő
- LECROY Waverunner LT342 digitális oszcilloszkóp
- PC munkaállomás

1.2 A pickup mérése

- Előerősítő
- ARIEL Model 656 audio erősítő
- BK 4502 gyorsulásérzékelő
- TR-1700 teljesítmény erősítő
- PHILIPS PM 5192 programozható jelgenerátor
- HAMEG HM 8030-5 jelgenerátor
- HAMEG HM 8011-3 digitális multiméter
- HAMEG HM 7042 tápegység
- BK 4810 shaker
- IWATSU DS6612 digitális oszcilloszkóp
- HP 3585B spektrumanalizátor
- PC munkaállomás

2. A húr mérésének eredményei

A húr mérésekor, a megpendített hang alap- és felharmonikusainak lecsengési állandóira voltunk kíváncsiak. A lecsengési állandók segítségével terveztük meg a az egypólusú veszteségi szűrőket. A spektrumanalízis alapján rögzítettük az alapharmonikus (A_0) és néhány felharmonikus (A_1 - A_5 , és néhol A_9 és A_{15}) amplitúdóját a lecsengés két szakaszán. A két szakasz távolsága N mintavételi pont, a hosszuk 65536 mintavételi pont. Megadjuk az első szakasz első mintavételi pontjával, hogy a lement hangmintákból melyik szakaszokat analizáltuk. Az amplitúdók segítségével kiszámoltuk a harmonikus λ lecsengési állandóját, és τ lecsengési időállandóját. Ahol a mérés eredményeit felhasználtuk a szűrőtervezéshez, ott az elkészült szűrő paramétereit megadom.

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	73.2	70000	67.1	160000	0.999995611	5.17
A_1	63.4	70000	41.3	160000	0.999984097	1.43
A_2	60.9	70000	52.44	160000	0.999993913	3.73
A_3	44.1	70000	22	160000	0.999984098	1.43
A_4	31.9	70000	6	160000	0.999981364	1.22
A_5	42.45	70000	18.3	160000	0.999982623	1.31
A_9	29.7	70000	17.2	160000	0.999952031	0.47
A_{15}	19.7	70000	7.8	160000	0.999954333	0.5

2.1 táblázat Üres E húr (82 Hz)

$$H_1 = \frac{0.992998}{1 - 0.007z^{-1}} \quad (\text{F.1})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	68.3	110000	44.95	160000	0.999983198	1.35
A_1	52.8	110000	24.5	160000	0.999979637	1.12
A_2	50.1	110000	3	160000	0.999966109	0.67
A_3	47.7	110000	0.4	160000	0.999965965	0.67
A_4	41.4	110000	-4.6	160000	0.999966901	0.69
A_5	40.5	110000	-5	160000	0.999967261	0.69

2.2 táblázat E húr oktáv (164 Hz)

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	57.5	80000	47.4	160000	0.999992783	3.12
A_1	64.6	80000	44.4	160000	0.999985465	1.56
A_2	47.2	80000	17.4	160000	0.999978557	1.06
A_3	39.5	80000	5.3	160000	0.99997539	0.92
A_4	44.1	80000	5.1	160000	0.999971938	0.81
A_5	40.5	80000	-1.4	160000	0.999969851	0.75

2.3 táblázat E húr A (110 Hz)

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	62.9	45000	53	160000	0.999992876	3.18
A_1	69.6	45000	51.5	160000	0.999986976	1.74
A_2	61.3	45000	52.9	160000	0.999993956	3.75
A_3	54.8	45000	38.4	160000	0.999988199	1.92
A_4	28.7	45000	15	160000	0.999990142	2.3
A_5	46.9	45000	31.8	160000	0.999989135	2.09
A_9	24.9	45000	-2.1	80000	0.999961145	0.58
A_{15}	45.2	45000	-2	80000	0.999932076	0.33

2.4 táblázat Üres A húr (110 Hz)

$$H_4 = \frac{0.996995}{1 - 0.003z^{-1}} \quad (\text{F.2})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	64.1	96000	42.1	160000	0.999984170	1.43
A_1	47.1	96000	9.6	160000	0.999973017	0.84
A_2	40.7	96000	4.9	160000	0.999974240	0.88
A_3	39.7	96000	-2.7	160000	0.999969491	0.74
A_4	33.2	96000	-1	160000	0.999975391	0.92
A_5	31.3	96000	13	160000	0.999986832	1.72
A_9	15.3	96000	3.6	100000	0.999986529	1.68
A_{15}	2.2	96000	-9.8	100000	0.999986185	0.64

2.5 táblázat A húr oktáv (220 Hz)

$$H_5 = \frac{0.999484}{1 - 0.0005z^{-1}} \quad (\text{F.3})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	62.2	96000	42.2	160000	0.999985609	1.58
A_1	52.6	96000	38.7	160000	0.999989998	2.27
A_2	42.9	96000	24.6	160000	0.999986832	1.72
A_3	36	96000	-2.7	160000	0.999972153	0.81
A_4	32	96000	-4.6	160000	0.999973665	0.86
A_5	31.3	96000	-6.6	160000	0.999972729	0.83
A_9	27.7	96000	9.5	80000	0.999973808	0.87
A_{15}	4.4	96000	-9	80000	0.99998716	1.17

2.6 táblázat A húr D (145 Hz)

$$H_6 = \frac{0.99849}{1 - 0.0015z^{-1}} \quad (\text{F.4})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	61.1	95000	38.4	160000	0.999983666	1.39
A_1	48.6	95000	5.7	160000	0.999969131	0.73
A_2	48.4	95000	4.1	160000	0.999968124	0.71
A_3	38.4	95000	-3.2	160000	0.999970067	0.76
A_4	39.6	95000	-2.4	160000	0.999969923	0.75
A_5	35.2	95000	0.7	160000	0.999975176	0.91

2.7 táblázat D húr oktáv (290 Hz)

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	65	86000	47.5	160000	0.999987408	1.8
A_1	63.8	86000	31.3	160000	0.999976615	0.97
A_2	29	86000	9.5	160000	0.999985969	1.62
A_3	42.8	86000	-3.2	160000	0.999966801	0.69
A_4	37.7	86000	-6.2	160000	0.999968412	0.72
A_5	30.7	86000	-5.7	160000	0.999973084	0.87

2.8 táblázat D húr G (196 Hz)

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	57.3	102000	45	80000	0.999982299	1.28
A_1	61.8	102000	45.1	80000	0.999975967	0.94
A_2	62.5	102000	33.8	80000	0.999958698	0.55
A_3	59	102000	33.7	80000	0.999963591	0.62
A_4	32	102000	3.2	80000	0.999958554	0.55
A_5	38	102000	-0.2	80000	0.999945027	0.41
A_9	13.3	102000	5.9	50000	0.999982961	1.33
A_{15}	2.9	102000	1.1	30000	0.999993092	3.28

2.9 táblázat H húr oktáv (490 Hz)

$$H_9 = \frac{0.9994}{1 - 0.0005z^{-1}} \quad (\text{F.5})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	64	80000	57.2	100000	0.999992171	2.9
A_1	58.7	80000	42.1	100000	0.999980889	1.19
A_2	48.4	80000	30.2	100000	0.999979047	1.08
A_3	57.6	80000	46.8	100000	0.999987566	1.82
A_4	54	80000	42	100000	0.999986185	1.64
A_5	67.1	80000	46.2	100000	0.999975938	0.94
A_9	46	80000	25.9	100000	0.999976859	0.98
A_{15}	32.9	80000	1.4	100000	0.999963735	0.63

2.10 táblázat Üres H húr (245 Hz)

$$H_{10} = \frac{0.99959}{1 - 0.0004z^{-1}} \quad (\text{F.6})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	54.5	85000	40.8	100000	0.999984227	1.44
A_1	55	85000	30.8	100000	0.999972139	0.81
A_2	54.4	85000	28.2	100000	0.999969837	0.75
A_3	62.1	85000	28.4	100000	0.999961202	0.58
A_4	69	85000	42.8	100000	0.999969837	0.75
A_5	61.1	85000	37.3	100000	0.999972599	0.83
A_9	42	85000	7.8	100000	0.999960627	0.58
A_{15}	22	85000	-1.4	50000	0.99997306	0.84

2.11 táblázat H húr E (324 Hz)

$$H_{11} = \frac{0.999535}{1 - 0.00045z^{-1}} \quad (\text{F.7})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	53.4	54000	35.9	50000	0.999959706	0.56
A_1	46.6	54000	14.2	50000	0.999925399	0.3
A_2	27.3	54000	-2.7	50000	0.999930925	0.33
A_3	14.8	54000	-0.8	50000	0.99996408	0.63
A_4	6.9	54000	-3	50000	0.999977205	0.99
A_5	13.4	54000	-13.8	50000	0.999937372	0.36
A_9	-9.2	54000	-18.9	50000	0.999977573	1.01

2.12 táblázat A húr G (384 Hz)

$$H_{12} = \frac{0.999811}{1 - 0.00015z^{-1}} \quad (\text{F.8})$$

	A_I [dB]	Hely I	A_{II} [dB]	N	λ	τ [s]
A_0	57.3	47000	36.3	50000	0.999951647	0.47
A_1	47.9	47000	23.8	50000	0.999944509	0.41
A_2	54.7	47000	22.3	50000	0.999925399	0.3
A_3	33	47000	-13.2	50000	0.999893626	0.21
A_4	19.3	47000	-6	30000	0.999902912	0.23
A_5	27.6	47000	-9.9	30000	0.999856099	0.16
A_9	-2.4	47000	-35.1	50000	0.999924708	0.3
A_{15}	-4.8	47000	-35.1	50000	0.999930234	0.33

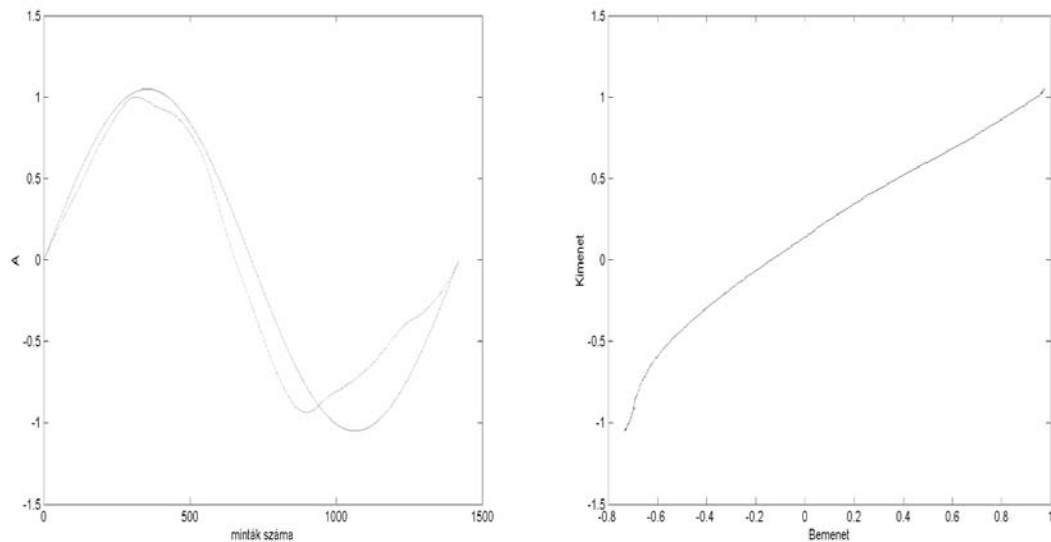
2.13 táblázat H húr A (872 Hz)

$$H_{13} = \frac{0.9998787}{1 - 0.00007z^{-1}} \quad (\text{F.9})$$

3. A pickup mérésének eredményei

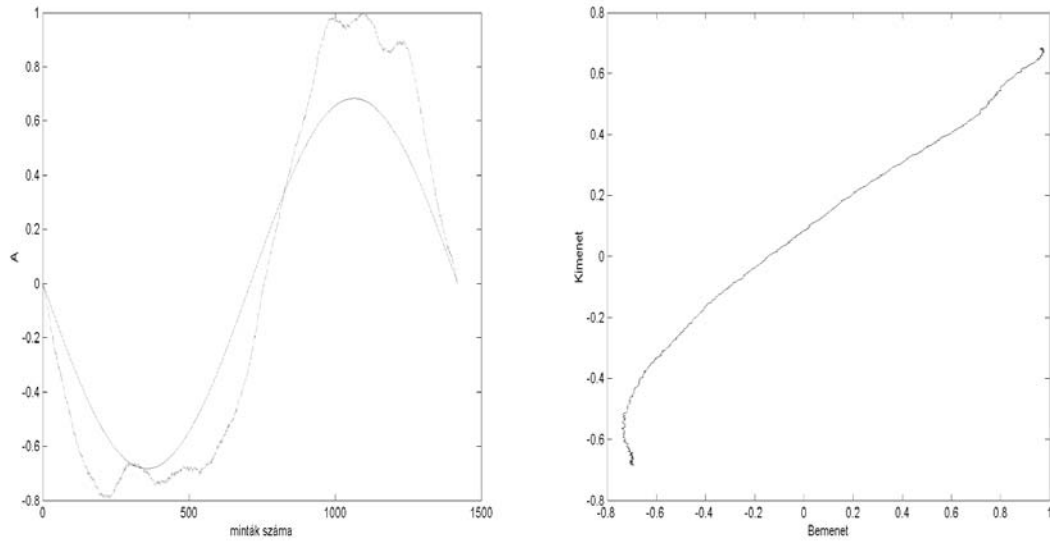
A pickup mérésekor a bemenet és kimenet kapcsolatára voltunk kíváncsiak. Az alábbiakban a mérés néhány eredményét, megmutatjuk a bementi és a kimeneti jelet, és a felrajzolt bemenet-kimenet függvény hiszterézisének középvezetét.

DiMarzio pickup, a természetes helyzetben (a pickupra merőlegesen), a húrtól 5 mm távolságra, a húr a pickup egyik mágnes felett (**F.1 ábra**).



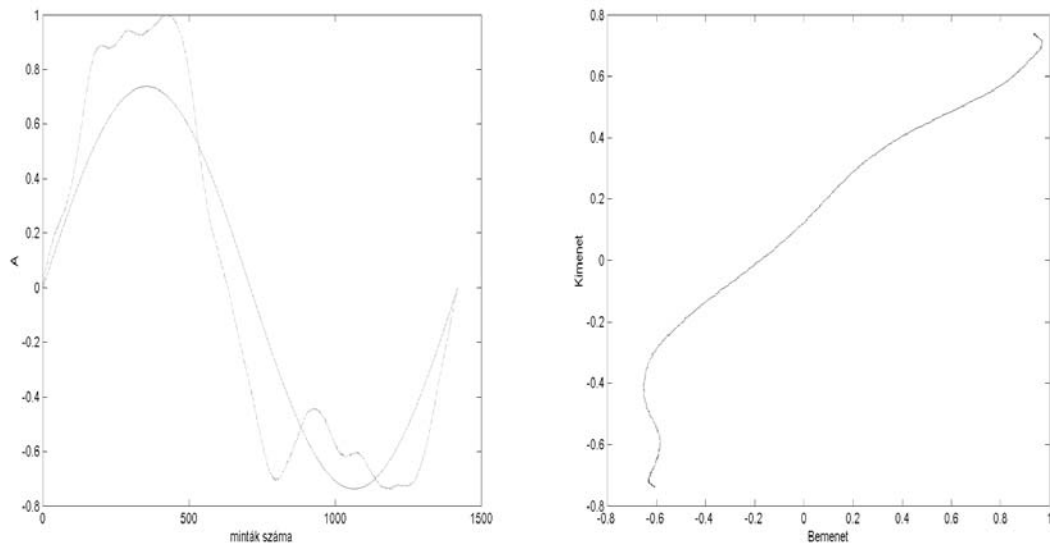
F.1 ábra DiMarzio pickup I.

DiMarzio pickup, a természetes helyzetben (a pickupra merőlegesen), a húrtól 1 cm távolságra, a húr a pickup egyik mágnes felett (**F.2 ábra**).



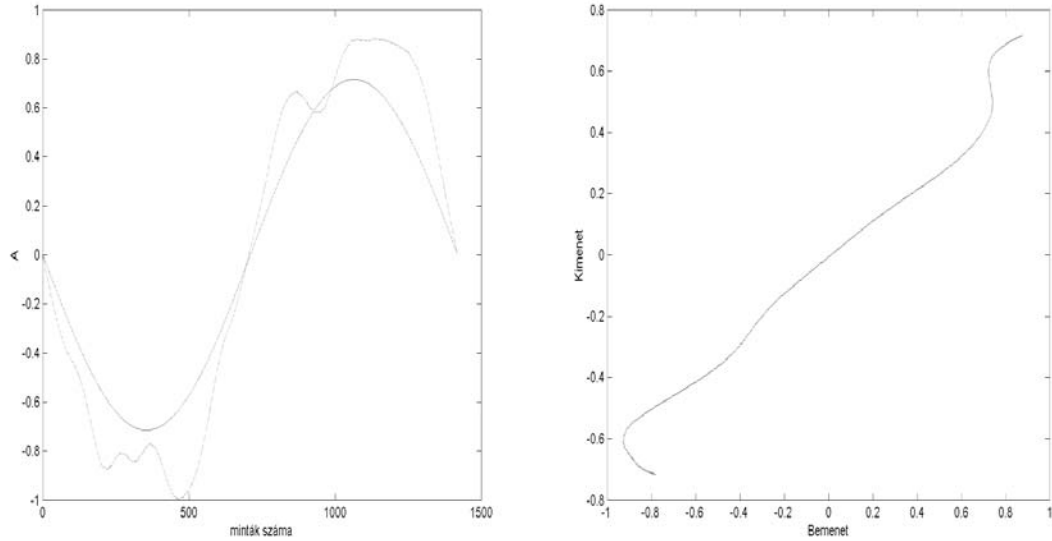
F.2 ábra DiMarzio pickup II.

DiMarzio pickup, a húrtól 5 mm távolságra, a húr a pickup két mágnes között, megjegyzendő, hogy ez a húrnak nem természetes helyzete (**F.3 ábra**).



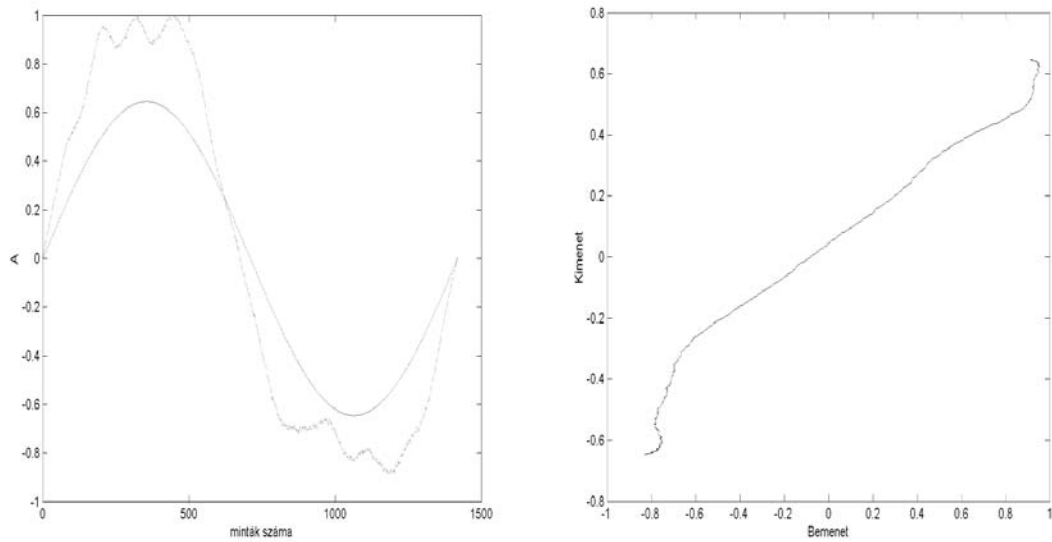
F.3 ábra DiMarzio pickup III.

Fibenare pickup, a természetes helyzetben (a picukpra merőlegesen), a húrtól 5 mm távolságra, a húr a pickup egyik mágnes felett (**F.4 ábra**).



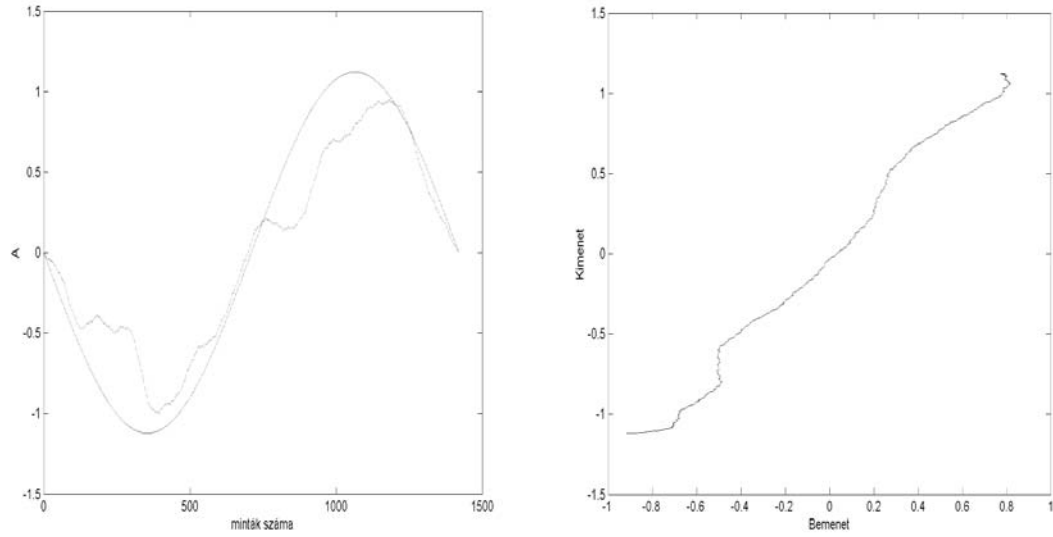
F.4 ábra Fibenare pickup I.

Fibenare pickup, a természetes helyzetben (a picukpra merőlegesen), a húrtól 1 cm távolságra, a húr a pickup egyik mágneses fölött (**F.5 ábra**).



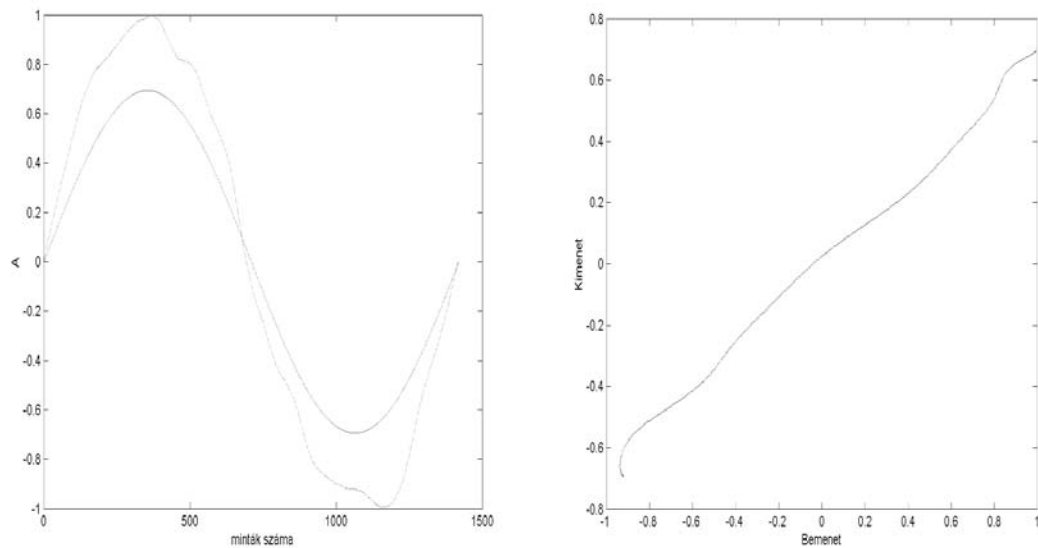
F.5 ábra Fibenare pickup II.

Fibenare pickup, a húrtól 5 mm távolságra, a húr a pickup két mágneses között, megjegyzendő, hogy ez a húrnak nem természetes helyzete (**F.6 ábra**).



F.6 ábra Fibenare pickup III.

Fibenare pickup, a húrtól 5 mm távolságra, a húr a pickup szélénél, megjegyzendő, hogy ez a húrnak nem természetes helyzete (**F.7 ábra**).



F.7 ábra Fibenare pickup IV.

Irodalomjegyzék

- Analog Devices, 1995. *ADSP-2100 Family, Users Manual*, Analog Devices
- Bank B., Nagy A., 1999. *Zongora- és hegedűhang szintézisének lehetőségei*, TDK dolgozat, BME MIT, BME HIT
- Bank, B. 2000. *Physics-Based Sound Synthesis of the Piano*, ISBN 951-22-5037-3
- Budó A., 1970. *Kísérleti fizika I.*, Tankönyvkiadó, Budapest
- Cuzzucoli, G., Lombardo, V., 1997. *Physical model of the plucking process in the classical guitar*, ICMC97, 172-179.
- Fletcher, N. H., Rossing T. D., *The physics of musical instruments*, ISBN 0-387-96947-0
- Fodor Gy., 1996. *Elektromágneses terek*, Műegyetemi kiadó, 55019
- Fürjes A., 1996. *Nyílt struktúrájú zenei hangszintézisek digitális jelfeldolgozó processzorral*, Diplomaterv, EVTSZ
- Karjalainen, M., Välimäki, V., Huopaniemi, J., Jánosy, Z., 1995. *Physical modeling of plucked string instruments with application to real-time sound synthesis*, 98th AES Convention Preprint
- Lombardo, V., Cuzzucoli, G., 1999. *A physical model of the classical guitar, including the player's touch*, Computer Music Journal, 23:2, 52-69. Summer 1999.
- Smith, J. O., Jaffe, D. A., 1983. *Extensions to the Karplus-Strong algorithm*, Computer Music Journal, 7(2):481-494.
- Smith, J. O., 1993. *Digital waveguide modeling of musical instruments*, CCRMA Publications, Draft, 7-24-93.
- Turner, B., 1999. *The beginning of the noiseless pickup era*, Fender Frontline – Player's Guide Vol. 26. Jul-Dec. 1999.
- Välimäki, V., 1995. *Discrete-time modeling of acoustic tubes using fractional delay filters*, PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, p. 193.

Ábrajegyzék

2.1 ábra <u>Általános hangszermodell</u>	6
3.1 ábra <u>Az elektromos gitár részei (Ibanez S2020X)</u>	8
3.2 ábra <u>Az elektromos gitár modellje</u>	9
3.3 ábra <u>A húrban kialakuló állóhullámok</u>	10
3.4 ábra <u>„Humbucker” pickup (Fender)</u>	13
3.5 ábra <u>Mágnesek elhelyezkedése a pickupban [Bartolini2000]</u>	14
3.6 ábra <u>A húr harmonikusai a különböző pickup-oknál</u>	14
4.1 ábra <u>A Karplus-Strong algoritmus</u>	16
4.2 ábra <u>A húr waveguide modellje</u>	18
4.3 ábra <u>A bővített húrmodell</u>	19
4.4 ábra <u>A húron megpendített D hang időfüggvénye</u>	21
4.5 ábra <u>Az időfüggvényből kivágott két tartomány</u>	22
4.6 ábra <u>Az időfüggvény két különböző szakaszának spektruma</u>	23
4.7 ábra <u>6 db λ értékre illesztett egypólusú szűrő</u>	24
5.1 ábra <u>A húrban haladó hullámok</u>	26
5.2 ábra <u>A húrt egyensúlyban tartó erők kitérítéskor</u>	27
5.3 ábra <u>A gerjesztő test mechanikai modellje</u>	28
5.4 ábra <u>A húr kitérése ha $M_d = 0.5g$ és $R_d = 1$</u>	31
5.5 ábra <u>A húr kitérése, ha $M_d = 3g$ és $R_d = 1$</u>	31
5.6 ábra <u>A húr kitérése, ha $M_d = 0.5g$ és $R_d = 6$</u>	32
5.7 ábra <u>A húr kitérése, ha $M_d = 3g$ és $R_d = 6$</u>	32
5.8 ábra <u>A tompítás hatása, ha $R_d = 5$</u>	34
5.9 ábra <u>A tompítás hatása, ha $R_d = 2$</u>	34
5.10 ábra <u>A tompítás hatása két hang között ($R_d = 5$)</u>	35
6.1 ábra <u>Pickup terének vizsgálata vasporral (felül- és oldalnézetből)</u>	37
6.2 ábra <u>A pickup mágnesének tere felül- és oldalnézetből</u>	37
6.3 ábra <u>A húr kitérése közvetlenül a pendítés után és kicsit később</u>	38
6.4 ábra <u>A pickup átlagoló hatása</u>	38
6.5 ábra <u>Az első mérési elrendezés</u>	40

6.6 ábra A húr és a PVC cső rögzítése a fémpálcára	40
6.7 ábra A shaker, a húr és a pickup elhelyezkedése	40
6.8 ábra A második mérési elrendezés	42
6.9 ábra A húr, a pickup, a shaker és a gyorsulásérzékelő	43
6.10 ábra Dinamikus és statikus nemlinearitás	45
6.11 ábra A pickup nemlinearitása és deriváló hatása	46
6.12 ábra Az átlagolt integrálfüggvény meredekségei	46
6.13 ábra A referencia szinusz (piros) és a pickup kimenete (kék), két különböző pickup-nál	47
6.14 ábra A pickup bemenetének és kimenetének kapcsolata, két különböző pickup-nál	47
6.15 ábra A hiszterézis középvonala, két különböző pickup-nál	48
6.16 ábra A megvalósítandó nemlinearitás	49
6.17 ábra Az átlagoló hatás megvalósításának egy esete	50
6.18 ábra A megvalósítandó pickup-modell	50
7.1 ábra A megvalósított program szerkezete	53
7.2 ábra A 32 bites húrmodell	54
7.3 ábra A nemlinearitás „kvantálása” és az interpoláció	55
2.1 táblázat Üres E húr (82 Hz)	62
2.2 táblázat E húr oktáv (164 Hz)	63
2.3 táblázat E húr A (110 Hz)	63
2.4 táblázat Üres A húr (110 Hz)	63
2.5 táblázat A húr oktáv (220 Hz)	64
2.6 táblázat A húr D (145 Hz)	64
2.7 táblázat D húr oktáv (290 Hz)	64
2.8 táblázat D húr G (196 Hz)	65
2.9 táblázat H húr oktáv (490 Hz)	65
2.10 táblázat Üres H húr (245 Hz)	65
2.11 táblázat H húr E (324 Hz)	66
2.12 táblázat A húr G (384 Hz)	66
2.13 táblázat H húr A (872 Hz)	66
F.1 ábra DiMarzio pickup I.	67
F.2 ábra DiMarzio pickup II.	68

<u>F.3 ábra</u> DiMarzio pickup III.....	68
<u>F.4 ábra</u> Fibenare pickup I.....	69
<u>F.5 ábra</u> Fibenare pickup II.....	69
<u>F.6 ábra</u> Fibenare pickup III.....	70
<u>F.7 ábra</u> Fibenare pickup IV.....	70

Melléklet

A CD-melléklet tartalma:

Eredmények könyvtár:

- Ahan16.wav : A DSP-n megvalósított 16 bites waveguide hangja, veszteségi szűrővel.
- Ahan32d.wav : A DSP-n megvalósított 32 bites waveguide hangja, veszteségi szűrővel, deriváló hatással.
- Ahan32.wav : A DSP-n megvalósított 32 bites waveguide hangja, veszteségi szűrővel.
- Dallam.wav : A DSP-n megvalósított dallamjátszóval egy egyszerű dallam.
- Demo.wav : Egyirányú, 16 bites waveguide-dal eljátszott skála, hangolás nélkül.

HurMeres könyvtár: A húr mérése folyamán felvett wave fájlok.

Picupmeres20020405 könyvtár: A pickup mérése folyamán felvett wave fájlok.

Szimulacio könyvtár:

- Md05Rd2Kd0.wav : A húr és a gerjesztés hangja, ha $Md=0.5$, $Rd=2$, $Kd=0$.
- Md1Rd5Kd0.wav : A húr és a gerjesztés hangja, ha $Md=1$, $Rd=5$, $Kd=0$.
- Md3Rd2Kd0.wav : A húr és a gerjesztés hangja, ha $Md=3$, $Rd=2$, $Kd=0$.
- Md3Rd2Kd3000.wav : A húr és a gerjesztés hangja, ha $Md=3$, $Rd=2$, $Kd=3000$.
- Analiz.m : A pickup mérésének analíziséhez használt program.
- Excitation.m : A húr és a gerjesztés szimulációját végző program.

Diploma.doc : A diplomamunka Word2000 formátumban