



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Popovics Bence

ORGONAHANG-ELEMZŐ MÓDSZEREK ÉS SZOFTVER FEJLESZTÉSE

KONZULENS

Dr. Rucz Péter

BUDAPEST, 2020

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	5
Abstract.....	6
1 Bevezetés	7
1.1 Motiváció	7
1.2 A dolgozat felépítése	7
2 A hangszerek királynője.....	8
2.1 Az orgona története.....	8
2.2 Az orgona szerkezete	10
2.3 A sípok	12
2.3.1 Ajaksípok.....	12
2.3.2 Nyelv sípok	14
2.4 A síphang tulajdonságai	15
3 Jelfeldolgozás.....	17
3.1 Exponenciális átlagolás.....	17
3.2 FFT.....	19
3.3 HPS-módszer	21
3.4 Frekvenciamérés	24
3.5 Újramintavételezés.....	25
3.6 A vizsgált jellemzők értékeinek kinyerése	26
3.7 A felfutás karakterisztikája	27
4 A feladat megoldása.....	30
4.1 A program specifikációja.....	30
4.2 A program architektúrája	30
4.2.1 Sound	31
4.2.2 Calibration	31
4.2.3 Window osztályok	31
4.2.4 Panel osztályok	32
4.2.5 Application.....	33
4.3 Logikai felépítés	34
4.4 A program működése.....	35
5 Végeredmény	50

5.1 Értékelés.....	50
5.2 Továbbfejlesztési lehetőségek	50
6 Összegzés.....	51
7 Köszönetnyilvánítás	52
Irodalomjegyzék.....	53

HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

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

Kelt: Budapest, 2020. 12. 11.

.....
Popovics Bence

Kivonat

Az orgonaépítés hagyományának művészeti és technológiai hatása az európai kultúrára megkerülhetetlen. A sípos orgona az egyik legnagyobb méretű és komplexitású hangszer, melyre előszeretettel alkottak a különböző korszakok szerzői. Egy használatban lévő orgona folyamatos karbantartást igényel, ami egy több száz sípot számláló hangszer esetén nem kis feladat, tekintve, hogy a sípok hangját sok tényező befolyásolja. Az orgonaépítők munkáját nagyban segítheti egy olyan szoftver, mellyel elemezhetők a sípok hangjáról készült felvételeket.

Jelen dolgozat betekintést nyújt az orgonák világába, és ismerteti azokat a jelfeldolgozási módszereket, melyekkel kiértékelhetők a sípok hangjairól készített felvételek. Bemutatásra kerül egy, a probléma megoldására a feldolgozási módszereket felhasználva készített Matlab alkalmazás is.

Az elkészített program képes különválasztani a vizsgált hang szakaszait, megállapítani a pontos alaphfrekvenciáját, újrámintavételezni a hangjelet, elemzéseket végezni a hang kitartásának és felfutásának szakaszain, valamint összehasonlítani a különböző hangok jellemzőit. Mindezt egy felhasználóbarát grafikus felületen keresztül teszi.

Abstract

The tradition of organ building had a huge impact on European arts and technology. The pipe organ is one of the largest and most complex musical instruments, and was fondly used by numerous composers through the centuries. A regularly played pipe organ requires constant maintenance, which could be quite a large work in the case of hundreds of pipes, considering the fact that the sound of each pipe depends on multiple factors. A software that is capable of analyzing the pipe sounds would facilitate the work of the organ builders.

This thesis provides an insight into the world of pipe organs and presents the different signal processing methods used to analyze the sound recordings. Furthermore, a Matlab application, which was developed to solve the problem is also presented in this thesis.

The software is capable of dividing the recorded sounds into its characteristic sections, measuring the precise fundamental frequency, resampling the signal, analyzing its stationary and transient parts, and comparing the characteristics of the different sounds with each other by means of a user-friendly graphical interface.

1 Bevezetés

1.1 Motiváció

A témaválasztásom személyes indíttatású. Zongoristaként egy ideje az orgonák világa is foglalkoztat. A szülővárosomban sokszor volt alkalmam játszani egy 1913-as építésű, pneumatikus Rieger orgonán. A hangszernek két billentyűzete és tizenhat regisztere van, de az teszi igazán különlegessé, hogy megúsza a világháborúk és a korszerűsítések káros hatását. Az eredetileg hozzá készített ón- és fasípokat tartalmazza, és feltehetőleg a többi alkatrésze sem lett kicserélve. Viszont nincs rendesen karbantartva, ráfér egy komolyabb restauráció, amellyel visszahozható a több, mint száz évvel ezelőtti hangzás.

A hangszer hibái miatt kezdett el érdekelni a jelfeldolgozás, és az általa kinyerhető kvantitatív információk felhasználása. A műemléki értékű hangszer helyrehozatala túlmutat a dolgozatomon, viszont úgy gondolom, hogy az általam fejlesztett szoftver nagyban segítheti majd az orgonaépítő munkáját, és más orgonák analizálásánál, hangolásánál, vagy egyéb, az intonációs elemzés eredményeit felhasználó műveleteknél is hasznos lehet.

1.2 A dolgozat felépítése

A munkám elején az orgonák történetéről, működéséről, az orgonasípok sajátosságairól, valamint hangjuk főbb tulajdonságairól írok. Ezek után a jelfeldolgozás menetét ismertetem, kitérve a különböző lépések működésére, melyekkel el lehet jutni a hangfelvétel betöltésétől a vizsgált tulajdonságok értékeinek kinyeréséig. Az itt leírt módszereket alkalmazva a síphang elemzésére és az eredmények összehasonlítására képes, felhasználóbarát felülettel rendelkező szoftvert készítek Matlab környezetben. Ismertetem a tervezés és a fejlesztés menetét, az alkalmazás szerkezeti és logikai felépítését, és használatának módját. Végül bemutatom a végeredményt, összegzem és értékelem a munkát, valamint kitérek a továbbfejlesztési lehetőségekre is.

2 A hangszerek királynője

A ma is használatos, Hornbostel-Sachs-féle osztályzás szerint az orgona az aerofon hangszerek közé tartozik. Itt található minden olyan hangszer, melyek hangkeltéséért légáramlatok mozgása felel, így a fúvósok, a harmonika és a harmónium is. [1, pp. 9-11]

Az aerofon hangszerek megjelenéséhez képest viszonylag friss találmány az orgona, viszont a legelterjedtebb, ma is használatos zenészerszámok között kifejezetten idősnek számít.

2.1 Az orgona története

Az orgona sajátosságait két ősi hangszertől származtatják. A pánásíp egymás mellé helyezett sípjait, többszólamú megszólalását, és a dudánál megjelent mesterséges tüdőt is megörökölte.

Közvetlen elődjének a hydraulos-t vagy víziorgonát tekintjük. Zenetörténészek szerint az alexandriai mérnök, Ktészipiosz találta fel, időszámításunk előtt 250 körül. A hangszertestben egy hidraulikus prés szolgáltatta a szükséges, és állandó légnyomást. A két, egymásba fordított edényből álló présbe két visszacsapó szelepes pumpával juttatták a levegőt, ami a sípok alatt található szelepek nyitásával szabadulhatott ki, megszólaltatva a hangszert. A mechanizmust Heron ismertette először, időszámításunk előtt 120 körül, Pneumatica című művében. Az itt leírt orgonának még csak 8 sípja volt. A víziorgona az első aerofon hangszer, melynek levegőellátását nem az emberi légzőszerv-rendszer szolgáltatta, a szelepeit kezelő szerkezetben pedig a modern billentyűsor őseit ismerhetjük fel.

A víziorgonát a Római Birodalomban cirkuszi játékok és sportesemények alkalmával használták előszeretettel, átható, erős hangja miatt. A birodalom széthullása után Bizáncban vitték tovább az orgonaépítés hagyományát, itt cserélték le a hidraulikus prést légtömlőre, és innen hódította meg Európát. Mivel a „pogány” hangszer tiltva volt az egyházi szertartásokról, és drágának is számított, kezdetben királyok ajándékaiként terjedt el. Liturgikus hangszerré VIII. János pápa alatt vált, 872-ben.

A középkor alatt lett igazán nagygyá a hangszer mind méretét, mind hangzását tekintve. A XII. században jelent meg az úgynevezett mixtúra, vagy kevert játék, amely lehetővé tette, hogy egy billentyűvel több sípot is meg tudjanak szólaltatni. A középkori orgona hangja monumentális és homogén volt, ami jól illeszkedett a kevés szólamból álló énekekhez. A reneszánsz kor, a többszólamúság kiteljesedésével viszont más megközelítést igényelt. A jól elkülönülő, letisztult szólamok használatához létrehozták a regisztereket, melyekkel a játékos szabadon válthat a megszólaló sípsorok között, általánossá vált a pedálsor építése, és többféle hangszín került a rendszerbe. Ekkor jelentek meg a fuvola-, trombita-, harsona- és a nyelvsíp-regiszterek is.

Kiforrottságát, pompáját és igazán nagy megbecsülését az orgona a barokk korra érte el. Egyszerűsödött a szerkezete, kifinomultabbá váltak a hangszínei és elkezdtek megjelenni a vonós-regiszterek is. Ezek a hangszerek nem csak hangzásukban, de kialakításukban is lélegzetelállítónak számítanak. A kor orgonistáitól a virtuóz játék, és a rögtönzés művészetének magas szinten való űzése is elvárt volt. Olyan szerzők gazdagították ekkor az orgonairodalmat, mint Buxtehude, Frescobaldi, Händel és Johann Sebastian Bach. Összetettsége, mérete, hangszínei, játéktechnikája, a liturgikus zenében betöltött különleges szerepe, és repertoárja miatt ekkor kapta a „hangszerek királynője” jelzőt.

A klasszicizmus és a romantika világában egyre nagyobb népszerűségnek örvendtek a főleg vonósokból álló nagyzenekarok, mivel a bennük rejlő dinamikai és hangszínbeli szélsőségekkel való finom játék lehetősége miatt alkalmasak voltak élő, és az érzelmek széles skáláját felvonultató zenei élmény megteremtésére. Az orgonaépítés is alkalmazkodott a kor emberének ízléséhez. Az ekkor készült orgonák szerepe a zenekari hangzás imitálása lett. Nagy hangsúlyt kaptak a vonós hangszínek, és megjelent a hangerő folyamatos változtatását megvalósító redőny is. Az új lehetőségek a játéktechnikát is megváltoztatták. A különálló, kidolgozott szólamok helyett az izgalmas harmóniakra került a hangsúly, és szimfonikus szerzeményekben is helyet kapott a hangszer. A romantikus orgonaművek nagy szerzőiként Mendelssohn, Franck és Liszt Ferenc nevét is meg kell említenünk. [1, pp. 126-131]

A XX. század legnagyobb vívmányai a sípos orgonák építésének területén az elektromágneses szelepek, és a hangszerrel rádiós kapcsolatban álló játékasztal megjelenése voltak. Előbbi a gyors, de gépies játékot, utóbbi az orgonista helyének a hangszertől függetlenített megválasztását teszi lehetővé. A romantika óta nem jelentek

meg új és meghatározó síptípusok, helyette az elmúlt korok elemeit vegyítették, finomították, új szerkezetű hangszereket építettek, és a régieket is korszerűsítették. A modern építésű orgonákkal kapcsolatban indult egy mozgalom, melynek hatására inkább a barokk mintához nyúltak vissza. [2, pp. 139-143] Itt szeretném megjegyezni, hogy az előző korokra is jellemző volt a már meglévő orgonák folyamatos átalakítása, az újabb igényekhez való igazítása, ezért manapság nagy ritkaságnak, és műemléki értékűnek számítanak az építési formájukban megmaradt régi hangszerek.

2.2 Az orgona szerkezete

Az orgonák egyedi módon, a terem tulajdonságaihoz és a művészi igényekhez igazodva épülnek, szerkezeti és működési elvükben viszont nagyban hasonlítanak egymásra.

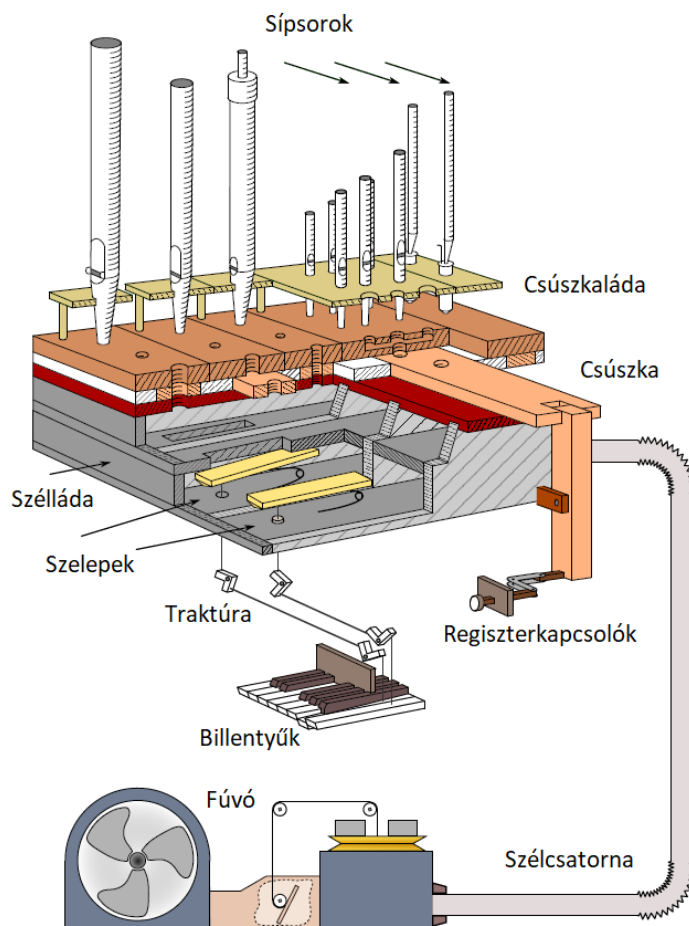
Eltérő szerepeik miatt az alábbi egységekre bonthatunk egy orgonát:

- orgonaház, vagy korpusz - a rendszer egészének védelmére szolgáló, általában homlokzati sípokkal díszített szekrény. A játékasztalon kívül minden alkotóelem ebben foglal helyet.
- sípmű – az orgona hangadó része. Itt található a hangszínük szerint sorokba rendezett sípok.
- játékasztal – a hangszer vezérléséért felelős egység. Magába foglalja a billentyűzeteket (a kézi manuálok és a lábbal megszólaltatott pedálok), a regiszterkapcsolókat (a különböző sípsorok, azaz a megszólaló hangszínek között váltó kapcsolók), a kottatartót, az orgonapadot és más kapcsolókat. Az orgonista innen szólaltatja meg a hangszert. Általában az orgonaház mellett helyezkedik el.
- fűvómű – a sípok megszólaltatásához szükséges sűrített levegőt állítja elő. Manapság motorral működtetett rendszer, melyhez fűvó és szélesatorna tartozik.
- szélláda – a sűrített levegő elosztásáért, tárolásáért és adagolásáért felelős ládaszerkezet, tetején a nyitható szelepekkel.
- traktúra – a játékasztal és a szélláda összeköttetéséért felel. A kezdetben mechanikusan, később sűrített levegővel (pneumatikus orgonák) és elektromossággal működő rendszer teszi lehetővé, hogy a játékasztalon beállított hangképnek és a lenyomott billentyűknek megfelelő sípok szólaljanak meg.

- állványzat – az orgonaházban helyet foglaló szerkezeti részek tartásáért felel. [3, pp. 13-14]

Az orgonaház alsó részén helyezkedik el a szélláda, amelyhez a szélcsatornán keresztül szolgáltatja a levegőt a fúvómű. A szélláda fölött, a szelepeken kapcsolódnak a rendszerhez a sípok. Ezt a szerkezetet hálózzák be a traktúra részei, és kötik össze a korpuszon kívül található játékasztallal. Egy-egy hangszer akár több orgonaházból is állhat, így beszélhetünk főműről, pozitívműről, mellműről, redőnyműről, koronaműről vagy pedálműről az elhelyezésüket, és a bennük foglalt regisztereket figyelembe véve. Az orgonaházakat előszeretettel díszítették az építés korának megfelelő stílusban, templomokban általában az oltárdíszhez hasonlóan. [3, pp. 19-22]

A regisztrálható, azaz a hangszínek kiválasztására, keverésére alkalmas hangszereknél a regiszterkapcsoló aktiválásával sűrített levegő jut a sípsor minden rekeszébe, a billentyű lenyomásával pedig kinyílik a hozzá rendelt sípok szelepe. Ezzel a kétlépcsős megoldással lehetséges, hogy minden pillanatban csak azok a sípok szólalnak meg, melyek regiszterkapcsolója aktivált-, billentyűje pedig lenyomott állapotban van. [3, pp. 52-53] Az orgonák szerkezetét a 2.1-es ábra szemlélteti.



2.1. ábra: Az orgonák szerkezetének vázlata [4]

2.3 A sípok

A sípmű tartalma képezi az orgona lényegi részét. Hangszínüket, anyagukat és kialakításukat tekintve számtalan típusú síppal találkozhatunk.

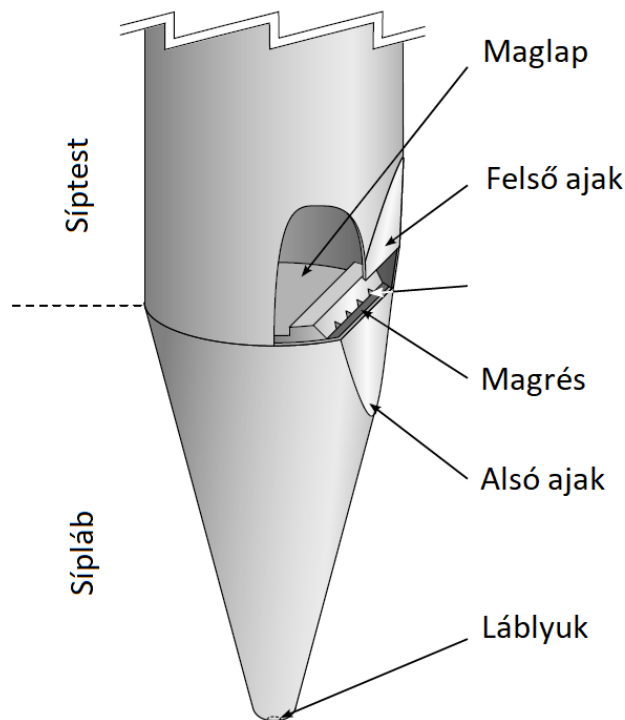
A sípok megszólalásához az kell, hogy a bennük lévő légoszlop hosszirányú rezgésbe jöjjön. Orgonák esetében erre kétféle megoldással találkozhatunk: ajaksípoknál az élhang, nyelvsípoknál pedig a fémből készült rezgő nyelv segítségével. [3, pp. 26]

2.3.1 Ajaksípok

Az élhang jelensége akkor jön létre, amikor egy keskeny részből kiáramló levegő a vele szemben elhelyezkedő éknek ütközik, és periodikus lengésbe kezd. [4, pp. 8]

Az ajaksípok működési elve a furulyáéhoz hasonlít. Ezek a sípok a 2.2-es ábrán látható módon két részből tevődnek össze: az élhang jelenségét előidéző síplábból, és a

hangot az áramlás hatására létrehozó síptestből. A sípládba beérkező sűrített levegő csak a magrésnek nevezett keskeny nyíláson folytathatja útját, ezzel sík szabadsugárrá válik. Ezután ütközik a szimmetrikus ék szerepét betöltő felsőajakba, előidézve a síptestben lévő légoszlop rezgését.



2.2. ábra: Az ajaksíp lábának felépítése [4]

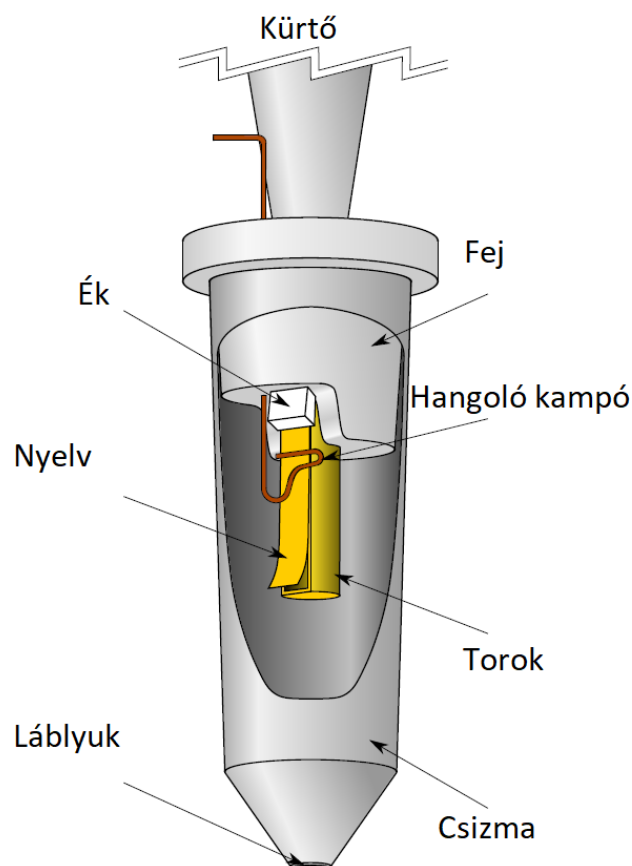
Az ajaksípek hangmagasságát hosszuk határozza meg. Minél hosszabb a síp, annál nagyobb hullámhosszú hang megszólalását idézi elő. A nagyobb hullámhossz alacsonyabb frekvenciát, tehát mélyebb hangot eredményez.

Az ajaksípek hangszíne elsősorban a nyitott végük terhelésétől függ. A síp keresztmetszetének és hosszának arányát menzúranak nevezzük. A legfontosabb és legerősebb hangszínű ajaksípeknek a principálokat vesszük, melyek menzúráját az oktávonkénti $1:\sqrt{8}$ arányban határozta meg Johann Töpfer német orgonaművész a 19. században. Az ennél kisebb keresztmetszet-arányú sípek felhangdúsabbak, hangszínükben a vonósokéra hasonlítanak, a szélesebb menzúrával épült sípoknál pedig az alaphang dominál, a fuvolákéra emlékeztető hanggal. Ennek megfelelően a gyakorlatban is principál-, vonós- és fuvolasípoknak nevezik őket. [3, pp. 26-31]

2.3.2 Nyelvsípok

A nyelvsípoknál a betóduló levegő kényszeríti rezgésre a rugalmas fémlemezt, ami a hang létrejöttéért felel. A nyelvhez társított kürtő a hang felerősítéséért felelős rezonátor szerepét tölti be. A nyelvsípok működésükben a harmonika vagy a regál elvét követik, hangszínüket a fémlemez és a kürtő tulajdonságai határozzák meg.

Megkülönböztetünk rácsapó és átsapó nyelvsípokat. A rácsapó nyelvsípban a nyelv rácsap az úgynevezett torokra, ami a kürtő meghosszabbítása, míg az átsapóban a nyelv szabadon mozog mindkét irányba. Az rácsapó nyelvsípok felépítését a 2.3-as ábra szemlélteti.



2.3. ábra: A rácsapó nyelvsíp felépítése [4]

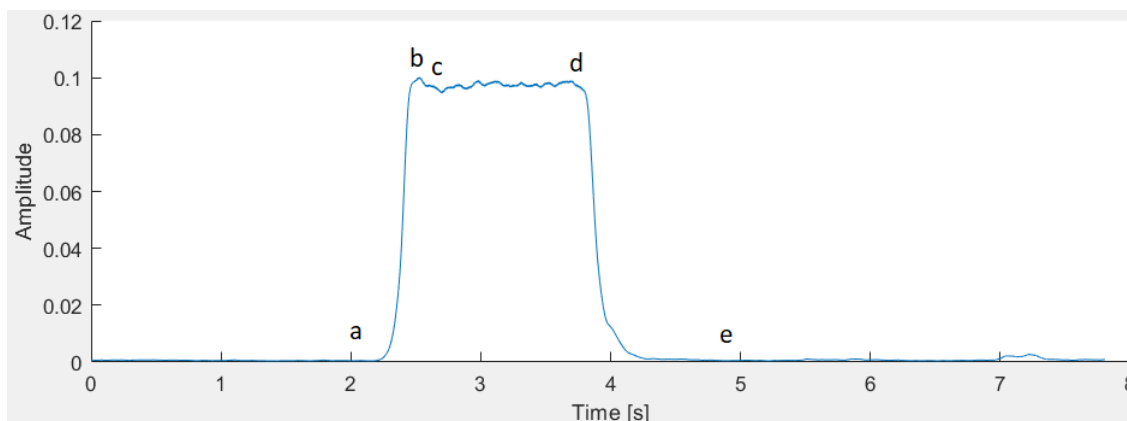
A nyelvsípok hosszútölcséres tagjai közé tartoznak többek között a trombita, harsona, oboa, fagott, klarinét, angolkürt regiszterek, a rövidtölcséres játékok között pedig a regált vagy a vox humana-t találjuk. [3, pp. 31-32]

2.4 A síphang tulajdonságai

A fülünket körülvevő rugalmas anyagban (általában levegőben) végbemenő, és a hallószervünk által felfogható nyomásváltozást hangként érzékeljük. Ha ez az ingadozás periodikus, zeneileg is értelmezhető hangról beszélünk. Az orgonasípok vizsgálatánál is ezek lesznek az érdekesek.

A zenei hangok három legfontosabb érzeti jellemzőinek hangosságukat, magasságukat és színezetüket vehetjük. Ezekhez a tulajdonságokhoz elkülöníthető, de egymással szoros kapcsolatban álló fizikai mennyiségek társulnak.

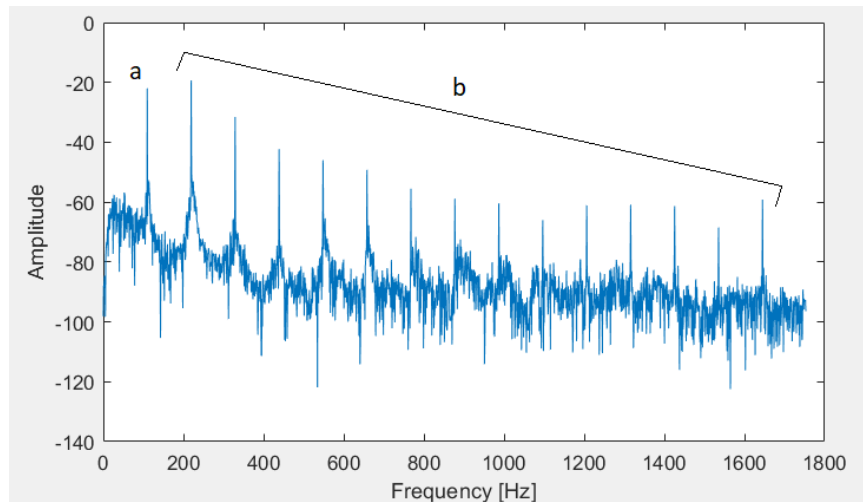
A nyomásváltozás keltette hangosságérzet az ingadozás amplitúdójával áll kapcsolatban. Az amplitúdóváltozást leíró görbét, ami a hang megszólalásától az elhallgatásáig tart, amplitúdóburkolónak nevezzük. A hang tartására alkalmas források esetében (például fűvós hangszerek) a burkolót négy szakaszra bonthatjuk: felfutásra, túllövés utáni visszaesésre, kitartásra és lecsengésre (angolul attack-decay-sustain-release), a 2.4-es ábrán látható módon. A feljebb ismertetett jellemzőkre vonatkozó elemzéseket érdemes a kitartott szakaszon elvégezni, mert a hang ebben az állapotában a legstabilabb.



2.4 ábra: Egy megszólalt síp amplitúdóburkolója. Az ábrán jól elkülönül a felfutás (a-b), visszaesés (b-c), kitartás (c-d) és lecsengés (d-e) szakasza

A hangmagasság a nyomásváltozás rezgésszámától függ. Ezen a frekvencián szól az alapharmonikus vagy alaphang. A természetes zenei hangok esetében az alapharmonikussal együtt a frekvenciája egész számú többszöröseinek megfelelő rezgésszámokon megszólalnak az úgynevezett felharmonikusok is. A felharmonikusok amplitúdóinak egymással vett arányai határozzák meg a hang színét. A felhangok

mintázatát jól szemlélteti a frekvencia-tartományban a hang spektruma. A 2.5-ös ábrán egy vonós síp spektruma látható.



2.5 ábra: Egy cselló síp hangjának spektruma az alaphanggal (a) és a felhangokkal (b)

A hang kitartott állapota mellett érdemes megvizsgálni a felfutását is. A hang által kifejtett érzetre a felfutás ideje, ez alatt a harmonikusok amplitúdóinak változása, és a túllövés mértéke is nagy hatással van. Az orgonasípok megszólalásának beállítását intonálásnak nevezzük. [6]

Az orgonák esetében a hangosság leginkább a szelládából kikerülő levegő nyomásától függ, de kisebb mértékben a sípok anyaga és alakja is hatással van rá. A hangmagasságot a síp vagy a rezgő nyelv hossza határozza meg. Az érzékelt hangszínrre hatással van többek között a megszólaló síp hangereje, hangmagassága, típusa, anyaga, alakja, valamint a berezgés miatt a szelepek és a traktúra típusa is. [3]

A hangszer használhatóságához elengedhetetlen, hogy a megfelelő hangoláson és a kiegyenlített dinamikán túl a regiszterek sípjai hangszínükben is összetartozó rendszert alkossanak.

3 Jelfeldolgozás

Dolgozatom a síphangok objektíven mérhető jellemzőinek meghatározásáról szól. A feladat megoldásaként elkészített programom a vizsgált értékek kinyeréséhez az orgonasípokról készült hangfelvételeken végzi el a számítási lépéseket. Ebben a részben a felhasznált jelfeldolgozási lépések működését ismertetem.

3.1 Exponenciális átlagolás

Ahhoz, hogy a hang kitartott szakaszán elvégezzük a hang jellemzőire vonatkozó számításokat, mindenekelőtt szükségünk van az amplitúdó-burkolójára, ami alapján ki tudjuk jelölni a szakaszt. Egy hangfelvétel a megszólalt hangnak a mikrofon által leképzett hullámformáját tárolja, ahol a nyomásváltozás pillanatnyi értékei pozitív és negatív mennyiségek között váltakoznak. Az amplitúdó-változás a nyomásváltozás effektív értékével áll arányban, melynek képlete a következő:

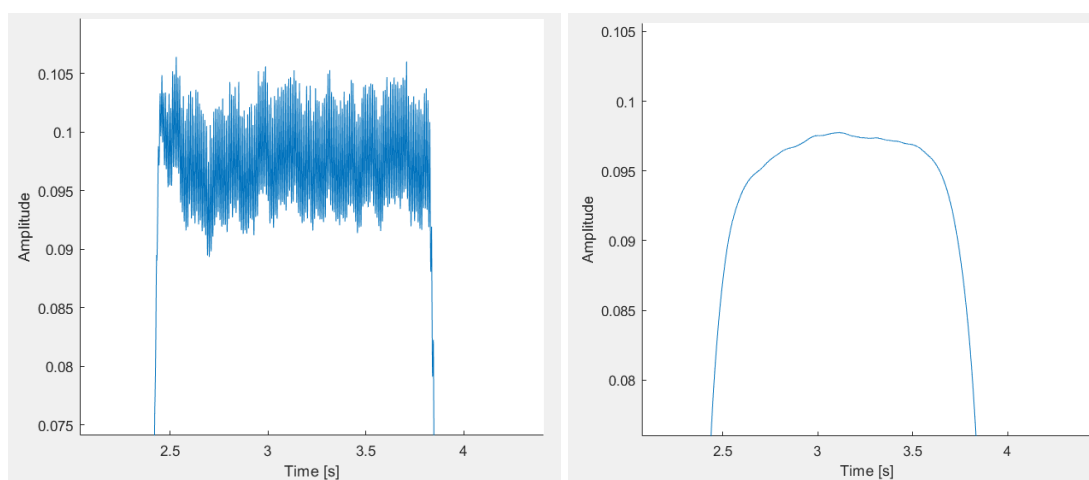
$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t - \tau) d\tau}$$

A nyomásváltozás effektív értéke lassú változásának követéséhez az exponenciális átlagolást érdemes alkalmazni. A módszer lényege, hogy az aktuális időpillanatban mért nyomásérték van a legnagyobb hatással a pillanatnyi effektív értékre, viszont hatványozottan csökkenő súllyal a korábbi időpillanatokban kiszámított értékeket is számításba vesszük. Mivel a tetszőleges pillanathoz rendelt effektív érték nem csak a pillanatnyi nyomásértéktől, hanem az összes azt megelőző pillanatban számított effektív értéktől is függ, követni tudjuk az effektív érték lassú változását, ami a megfelelő súlyokat megválasztva egyre kevésbé mozdul együtt a nyomásingadozással, mégis minden pillanatban elegendően pontos információt hordoz a valós értékről. A módszer rekurzív természetét kihasználva konstans súlyok alkalmazhatók, melyekkel egyszerű számolni. A nyomásmennyiség effektív értékének négyzetére kifejezve és az exponenciális átlagolást alkalmazva az alábbi képlet írható fel minden k diszkrét időpillanatra:

$$p_{eff}^2[k] = Qp^2[k] + (1 - Q)p_{eff}^2[k - 1],$$

ahol Q jelöli a súlyokat, és a $0 < Q < 1$ feltételnek teljesülnie kell ($Q = 0$ esetében nem vennénk számításba a nyomás értékét a vizsgált pillanatban, $Q = 1$ -nél pedig a korábbi értékeket veszítjük el, melyekre az exponenciális átlagolás definíciója szerint szükség van). [7, pp. 59-60]

$p_{eff}^2[k-1]$ súlyának, azaz az $(1-Q)$ értékének egy alkalmas megválasztása az $e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$, ahol Δt a felvétel időbeli felbontása (a mintavételi frekvencia reciproka), τ pedig az úgynevezett exponenciális időátlagolási konstans. Ennek a mértékétől függ, hogy mekkora súllyal vesszük be a korábbi elemeket a számításba. Túl kicsi τ mellett a burkoló nagy kitérésekkel változik együtt a nyomásingadozással, míg a túl nagy értékű τ -nál a burkoló annyira kisimul, hogy alig követi az amplitúdó-változást. A két végletet a 3.1-es ábra szemlélteti. Az ideális τ -érték a megszólaló hang alapfrekvenciájának függvénye, mértéke pedig az alapfrekvencia reciprokának (a hang periódus-idejének) többszöröse lenne. Mivel ezen a ponton nem ismerjük még az alapfrekvenciát, egy megfelelő konstanssal vagyunk kénytelenek helyettesíteni. A feladat megoldásánál a τ értékét 0.02 másodpercnek választottam, amivel elég jól lehetett számolni a különböző magasságú hangok esetében is.



3.1 ábra: Az amplitúdó-burkoló túl kicsi (balra) és túl nagy (jobbra) τ esetén

Az $Y = p_{eff}^2$ és $U = p^2$ behelyettesítéseket alkalmazva, és az egyenletet átrendezve az

$$Y[k] - (1 - Q)Y[k - 1] = QU[k]$$

egyenlőséget kapjuk, melyből előállítható a

$$H = \frac{Y}{U} = \frac{Q + 0z^{-1}}{1 - (1 - Q)z^{-1}}$$

szűrő. A szűrést az elemeiben négyzetre emelt hangfelvételen érdemes mindkét irányból elvégezni, ugyanis a szűrő fázistolásának visszafordításával a felfutásából adódó késleltetés kompenzálható.

A szűrés kimeneteként megkapjuk a hang amplitúdó-burkolóját, amely alapján egyszerűen elvégezhető a szakasz-szétválasztás.

3.2 FFT

Ahhoz, hogy megkapjuk az időtartománybeli hang spektrumát, el kell végeznünk rajta a Fourier-transzformációt, melynek képlete a következő:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

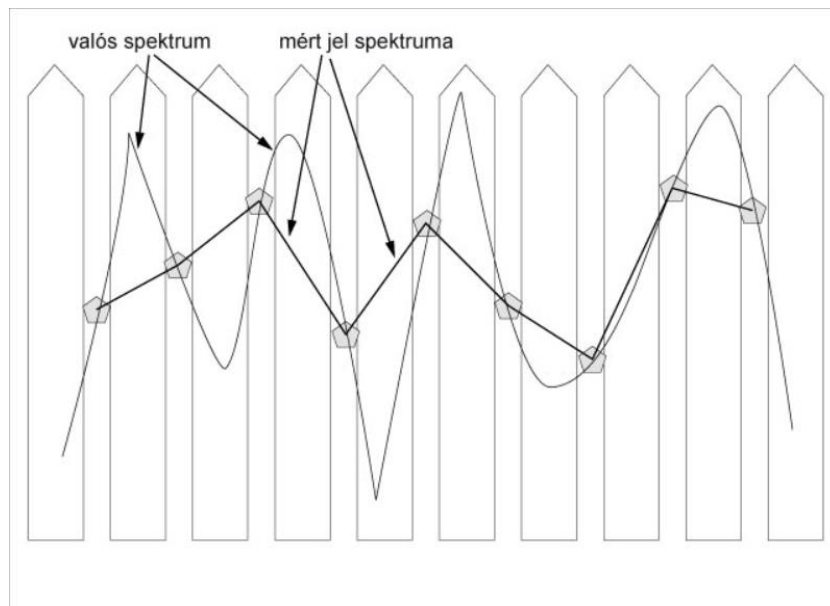
A hangfelvételek esetében nem tudunk végtelen időfelbontással dolgozni, ezért a diszkrét Fourier-transzformációt (Discrete Fourier Transformation, DFT) kell használnunk, amivel a pontos spektrumnak csak valamilyen közelítését tudjuk megadni. Mivel a transzformációt a véges T időintervallumú kitartott szakaszon végezzük, úgy tekinthetjük, hogy a számítás eredménye a szakasz periodikus kiterjesztése Fourier-sorának együtthatóit tartalmazza. Amennyiben a hang kiválasztott szakasza nem periodikus T -ben, a periodikus kiterjesztésben ugrások jelentkeznek, melyek torzítják a spektrumot. A jelenséget spektrális szivárgásnak nevezzük. A szivárgás csökkentése érdekében a transzformáció előtt egy megfelelő ablakfüggvénnyel érdemes súlyozni a jel vizsgált szakaszát, melynek kezdő- és végpontja nullával egyenlő. Egy alkalmas ablakfüggvény a Hann-ablak, amely egy emelt koszinusz-görbe, melynek minimumai az ablak széleinél vannak. A súlyozást követően a szakasz kezdő- és végértékei nullával lesznek egyenlők, így az eredmény periodikusnak tekinthető T -ben.

A T intervallum N darab diszkrét mintára bomlik, melyek az amplitúdó-burkolónál is tárgyalt Δt időbeli felbontással követik egymást. Az ablakfüggvénnyel periodikussá tettük a jelet, így a DFT-t elég a szakasz mintáin elvégezni, a következők szerint:

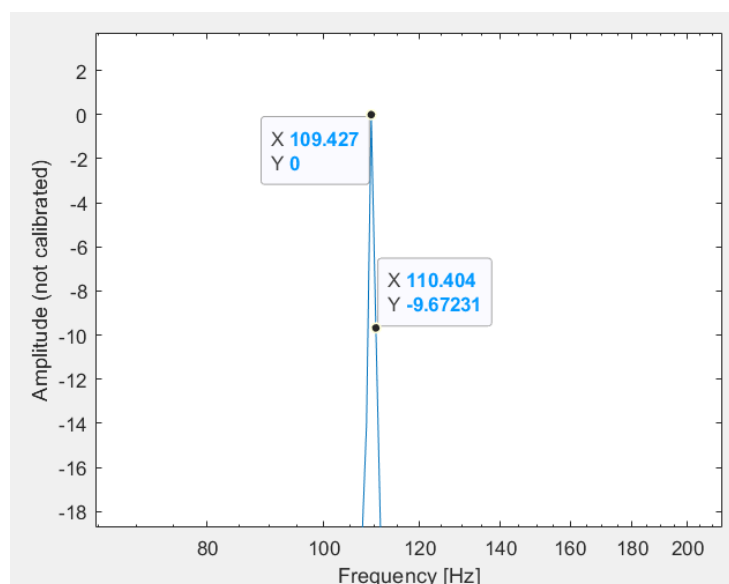
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} w[n]x[n]e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}, k = 0..N - 1.$$

Az $X[k]$ egy N mintából álló diszkrét spektrum, melynek minden eleméhez N darab összeadást kell elvégeznünk. Ebből következik, hogy a DFT algoritmus $O(N^2)$ komplexitású. A páros és páratlan tagok rekurzív különválasztásával, a triviális műveleteket elhagyva és így a DFT-t kisebb szakaszokon elvégezve J. W. Cooley és John Tukey 1965-ös publikációjukban leírtak egy $O(N \log N)$ komplexitású megoldást a problémára. Az algoritmust gyors Fourier-transzformációnak nevezik (Fast Fourier Transformation, FFT), és a számításokat végző szoftverekben is ezt alkalmazzák. A rekurzió miatt annyi többlet megkötése van, hogy N értéke kettő hatvány kell, hogy legyen.

Az eredményként kapott spektrum minden mintája között $\frac{f_s}{N}$ Hz különbség van, így a frekvenciafelbontás a mintavételi frekvenciától és a minták számától is függ. A mintavételi frekvencia a számítástól független érték, a minták száma pedig a vizsgált szakasz hosszának változtatásával befolyásolható, ami jelen helyzetben maximum a kitartott rész hosszának felel meg, így a felbontás nem javítható a végtelenségig. Ebből adódik az úgynevezett léckerítés-hatás. A léckerítés által kitakart tájhoz hasonlóan, mint ahogy az a 3.2-es ábrán is látható, a diszkrét spektrum pontjaiból csak a hang spektrumának szeleteit látjuk, melyekből nem tudjuk hibátlanul létrehozni a folytonos spektrumot. Ez akkor jelent problémát, ha a felbontás hibája miatt a 3.3-as ábrán látható módon nem tudjuk pontosan meghatározni a harmonikus komponensek frekvenciáját. A frekvenciák ismeretének hiányában az amplitúdók valódi értékeit sem tudjuk megállapítani, mert nem képezik részét a diszkrét spektrumnak. Periodikus jelek esetén koherens mintavételezéssel megszüntethető a léckerítés-hatás.



3.2 ábra: A léckerítés-hatás analógia szemléltetése [8]



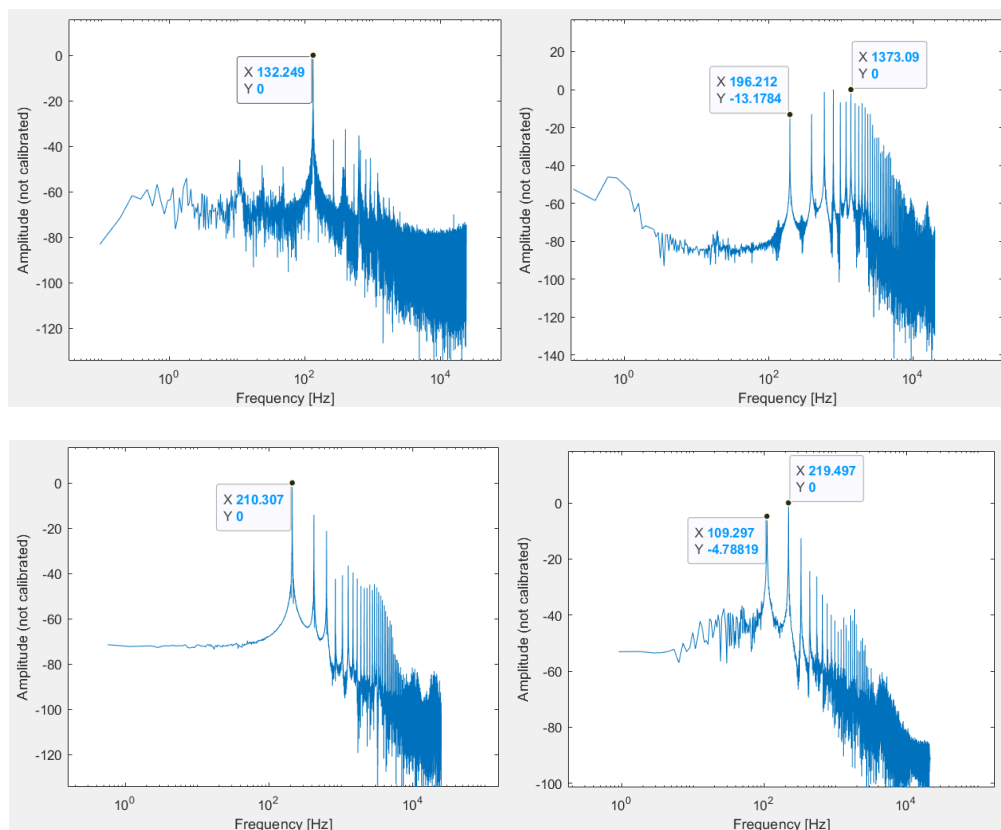
3.3 ábra: A léckerítés-hatásból adódó hiba szemléltetése. A vizsgált csúshoz tartozó pontos frekvenciaérték 109.66 Hz, ami valahol a két, egymást követő minta között van

3.3 HPS-módszer

A hang tulajdonságainak vizsgálatához pontos információkkal kell rendelkezünk a harmonikusai frekvenciájáról és amplitúdójáról. A feltétel teljesüléséhez olyan hangjelen kell elvégeznünk az FFT műveletet, aminek koherens a mintavételi frekvenciája. Az eredeti felvételből újramintavételezéssel előállítható a megfelelő hangjel, de ehhez tudnunk kell, hogy mi legyen az új mintavételi gyakoriság. Az új mintavételi frekvenciának a vizsgált hang alapharmonikusa rezgésszámának

valamilyen egész számú többszörösét kell választanunk, amihez viszont ismernünk kell az alaphang pontos frekvenciáját. Az alapharmonikus frekvenciáját a frekvenciamérés műveletével kapjuk meg. A frekvenciaméréshez szükségünk van egy jó becslésre a keresett frekvenciát illetően, amihez a rossz felbontású spektrum értékei is elegendő kiindulási alapot adnak.

Egy fuvola síp spektrumát megvizsgálva kézenfekvőnek tűnik az alaphang becsült frekvenciáját azon a ponton felvenni, ahol a spektrum maximuma van. Azonban más típusú sípok megfigyelve kiderül, hogy az alapfrekvenciához tartozó amplitúdó nem minden esetben a legnagyobb, és az egyszerű maximumkereséssel valamelyik felhang frekvenciáját kapjuk meg. A 3.4-es ábra különböző típusú sípok spektrumán szemlélteti a problémát.



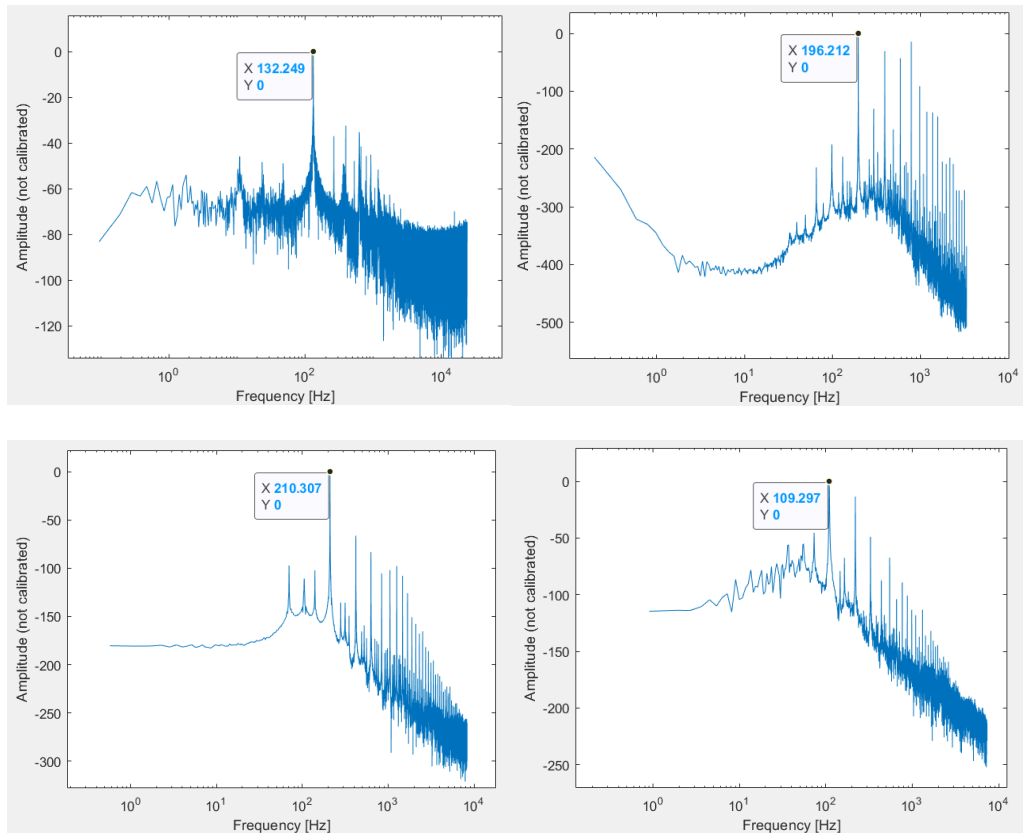
3.4 ábra: Fuvola (balra fent), trombita (jobbra fent), vox humana (balra lent) és cselló (jobbra lent) sípok spektruma, jelölve az alaphangot és a legerősebb harmonikust

A Harmoinc Product Spectrum (HPS) módszer alkalmas megoldást nyújt a problémára. A módszer kihasználja a természetes felhangsor azon tulajdonságát, hogy a felhangok az alaphang frekvenciájának egész számú többszörösein jelennek meg. A következő függvénnyel írható fel a működése:

$$X'(f) = \prod_{n=1}^N X(fn),$$

Ennek megfelelően a $X'(f)$ spektrumot úgy kapjuk meg, hogy az eredeti $X(f)$ spektrummal kezdve minden lépésben a $X(f)$ minden n . eleméből képzett spektrumot hozzászorozzuk az előző lépés eredményéhez. Ezzel minden lépésben a frekvenciatengelyen n -szeresen „összenyomjuk” a spektrumot, az összenyomással az $n - 1$. felhang amplitúdójának megfelelő érték kerül az alaphang frekvenciájához, ami az alaphang amplitúdóját súlyozza a szorzás hatására. A spektrum korlátait a mintavételi tételnek megfelelően figyelembe véve érdemes a képletet kiegészíteni azzal a megkötéssel, hogy ha fn nagyobb értéket venne fel, mint a mintavételi frekvencia fele, a súlytényező legyen egyenlő nullával.

Mivel ez alatt a többi felhangot zajjal, nullával vagy egyre kisebb amplitúdójú komponensekkel súlyozzuk, az algoritmus megfelelő számú ismétlése után a $X'(f)$ legnagyobb amplitúdójú harmonikus komponense az alaphang lesz. A becslésnek eleget tevő frekvenciát egyszerű maximumkereséssel megkaphatjuk. [9] A megoldás típusfüggetlenségét jól szemlélteti a 3.5-ös ábra.



3.5 ábra: A 3.4-es ábrán bemutatott hangok spektrumai a HPS-módszer megfelelő számú elvégzése után, ábrázolva az alaphangok jól becsült értékét

3.4 Frekvenciamérés

A HPS-módszerrel történő becslés egy, a tényleges alapfrekvenciához elég közel eső eredményt ad, de a frekvencia-felbontásból adódó hiba miatt még mindig nem pontos. Ahhoz, hogy megtaláljuk a valós frekvenciát, ki kell számolnunk, hogy mekkora az eltérése a becsült frekvenciához képest. A becsült eredményt a különbséggel kompenzálva megkapjuk a pontos alapfrekvenciát. Legyen $x(t)$ az eredeti hangjelünk, f_0 a keresett frekvencia, \hat{f}_0 pedig a becsült érték. Mivel hangjelről van szó, $x(t)$ -ről elmondható, hogy valós, amiből az is következik, hogy a spektruma páros.

Első lépésként az eredeti jelet egy egyoldali frekvencia-modulációval toljunk el \hat{f}_0 frekvenciával:

$$\tilde{x}(t) = x(t)e^{-j2\pi\hat{f}_0t}.$$

A modulációval létrejött $\tilde{x}(t)$ jel komplex, a spektruma pedig $x(t)$ spektrumának balra való eltoltságával egyenlő. Az eltolás mértéke \hat{f}_0 , így az eredeti spektrum f_0 -hoz tartozó értéke az $f_0 - \hat{f}_0 = \Delta f$ pozícióba került, ami egy, a nullához nagyon közel eső érték.

A többi spektrális komponenstől egy aluláteresztő szűrővel megszabadulva egy Δf frekvenciájú, A amplitúdójú és φ kezdőfázisú komplex harmonikus jelet kapunk, ami az alábbi formában írható fel:

$$x_{filt}(t) = Ae^{j2\pi\Delta ft + \varphi}.$$

Ennek a jelnek a diszkrét mintáival tudunk dolgozni, ahol $x_{filt}[k] = x_{filt}(k\Delta t)$. A Δt időbeli felbontás a mintavételi frekvencia reciprokával egyezik meg. A szűrt jel diszkrét idejű változata minden k mintára a következő:

$$x_{filt}[k] = Ae^{j2\pi k\Delta t\Delta f + \varphi}.$$

A keresett Δf frekvenciakülönbséget időtartománybeli illesztéssel találjuk meg. Ehhez írjuk fel először a $k + 1$. minta függvényét:

$$x_{filt}[k + 1] = Ae^{j2\pi(k+1)\Delta t\Delta f + \varphi}.$$

Vegyük a $k + 1$. és a k . minta hányadosát:

$$\frac{x_{filt}[k+1]}{x_{filt}[k]} = e^{j2\pi\Delta t\Delta f}$$

A két minta hányadosa független k -tól, értéke viszont csak akkor konstans minden k esetén, ha a jel tökéletesen harmonikus. Az x_{filt} -ről ez sajnos nem mondható el, mert terhelve van az aluláteresztő szűrő által átengedett zajjal. Legyen γ a keresett konstans. Ahhoz, hogy kompenzáljuk a szűrés zaja okozta hibát, fel kell írunk γ -ra a következő túlhatározott egyenletrendszert a jel összes mintájával:

$$\begin{bmatrix} x_{filt}[k+1] \\ x_{filt}[k+2] \\ \dots \\ x_{filt}[N] \end{bmatrix} = \gamma \begin{bmatrix} x_{filt}[k] \\ x_{filt}[k+1] \\ \dots \\ x_{filt}[N-1] \end{bmatrix},$$

ahol N a minták számával egyenlő.

A túlhatározott egyenletrendszert például a legkisebb négyzetek módszerével megoldva megkaphatjuk a gamma értékét. Ezt követően a

$$\Delta f = \frac{\arg\{\gamma\}}{2\pi\Delta t}$$

egyenlet megoldásaként megkapjuk a keresett frekvenciakülönbséget.

A becsült \hat{f}_0 -hoz hozzáadva Δf értékét, eredményül a vizsgált hang pontos alaphfrekvenciáját kapjuk. [10, pp. 3-5]

3.5 Újramintavételezés

Az alaphfrekvenciát ismerve, és egy $R = 2^n$ számot választva előállíthatjuk az f_{sre} koherens mintavételi frekvenciát az alábbi módon:

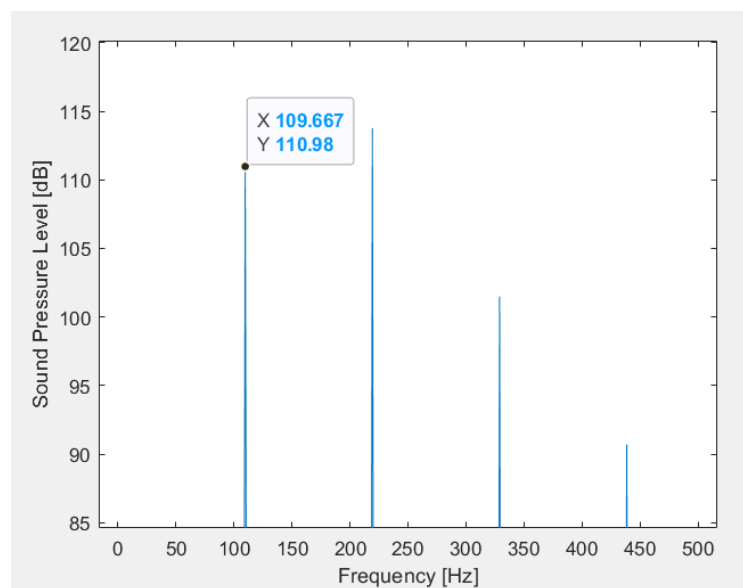
$$f_{sre} = Rf_0$$

Az új mintavételi frekvenciával újramintavételezett jel spektrumában megjelenő valós harmonikus komponensek száma R értékének felével lesz egyenlő. n értékét 5-nek, 6-nak vagy 7-nek érdemes választani a vizsgálni kívánt harmonikus komponensek számától függően. [10, pp. 5]

Az újramintavételezéshez először az f_{sre} és a jel pillanatnyi f_s mintavételi frekvenciája közötti arányt kell megállapítanunk. Legyen ez az arány $\frac{L}{M}$, ahol L és M természetes számok. A jel minden mintája közé vegyünk fel még $L - 1$ pontot, majd a kapott tömbnek minden M . elemét megtartva megkapjuk az újramintavételezett jelet. A

művelet két lépését interpolációnak és decimálásnak nevezzük. Amennyiben f_{sre} értéke kisebb, mint f_s (azaz $\frac{L}{M} < 1$), a spektrális átlapolódás elkerülése miatt figyelniük kell arra, hogy a mintavételi tételnek megfelelően a jelben megjelenő legmagasabb frekvencia-érték f_{sre} felével legyen egyenlő. Ennek a feltételnek az újramintavételezés műveletét megelőzve egy alul-áteresztő szűréssel tudunk eleget tenni.

Az újramintavételezést követően a megfelelő méretű ablakon elvégezve az FFT műveletét az eredő spektrum a harmonikus komponensekhez tartozó frekvenciákon a 3.6-os ábrán szemléltetett módon tűpontosan felveszi a hozzájuk tartozó amplitúdó-értékeket.



3.6 ábra: Az újramintavételezett jel spektrumának részlete. A koherens mintavétel miatt megállapítható a harmonikus komponensek pontos amplitúdója

3.6 A vizsgált jellemzők értékeinek kinyerése

Az alaphang frekvenciáját a frekvenciamérésből ismerjük, a vizsgált síp hangszínéhez és hangosságához kell még értéket társítanunk.

A hangszínt a harmonikus komponensek amplitúdóinak viszonya alapján tudjuk meghatározni. Ehhez érdemes kiszámolni a vizsgált hang spektrális centroidját. A centroid azt mutatja meg, hogy melyik frekvencia-értéknél van a spektrum súlypontja. Egy regiszter különböző hangmagasságú sípjai hangszínének összehasonlításához érdemes a centroidot az alapfrekvenciával normalizálni. Az így kapott érték a harmonikusok sorszámához viszonyítva adja meg a spektrum súlypontját, melyet a következő képlettel számíthatunk ki:

$$C(N) = \frac{\sum_{n=1}^N na(n)^2}{\sum_{n=1}^N a(n)^2},$$

ahol N a számításban részt vevő harmonikusok száma, $a(n)$ pedig az n . harmonikus komponens amplitúdója. Az eredmény azt mutatja meg, hogy hányadik harmonikus környékén van a spektrum súlypontja. A sötét, felhangszegény hangú sípoknál az alaphang dominál, és a centroid egy, az egyhez közel eső értéket vesz fel. Minél fényesebb, felhanggazdagabb a síp hangszíne, a kiszámolt centroid-érték annál magasabb lesz.

A síp hangossága a harmonikus komponensek amplitúdói négyzetösszegének gyökével egyezik meg, azaz:

$$A(N) = \sqrt{\sum_{n=1}^N a(n)^2},$$

ahol N a számításban résztvevő harmonikusok számával, $a(n)$ pedig az n . harmonikus amplitúdójával egyezik meg. Az eredmény önmagában kevés információt hordoz a síp valódi hangosságáról, mert a hangfelvétel, amelyen a számításokat végezzük a levegő rezgéseinek a mikrofon által leképzett értékeit tárolja. A valódi hangerő meghatározásához kalibrálnunk kell a mikrofont, ami azt jelenti, hogy egy ismert frekvenciájú és amplitúdójú szinusz-jelet generáló kalibrációs kapszulába helyezzük a mikrofont, és ott készítünk vele felvételt. A felvett szinusz amplitúdójából és a kalibrátor ismert hangnyomásszintjéből meghatározhatunk egy arányt, ami a mikrofon amplitúdó-leképezését jelöli. Az arányosságot felhasználva a vizsgált síp felvételén kiszámolt hangosságból meg tudjuk határozni az abszolút hangnyomásszintet, amivel a síp megszólalt.

A fenti képletekből jól látszik, hogy a spektrális centroid és a hangosság értékei a számításba vett harmonikusok számától függ. A számításokhoz elegendőnek tekinthető harmonikusok számát a vizsgált síp típusa határozza meg. Mivel az egyre magasabb felhangok tipikusan egyre kisebb amplitúdóval rendelkeznek, egy adott küszöb fölött a harmonikusok számának növelése nem változtat jelentősen az eredményeken.

3.7 A felfutás karakterisztikája

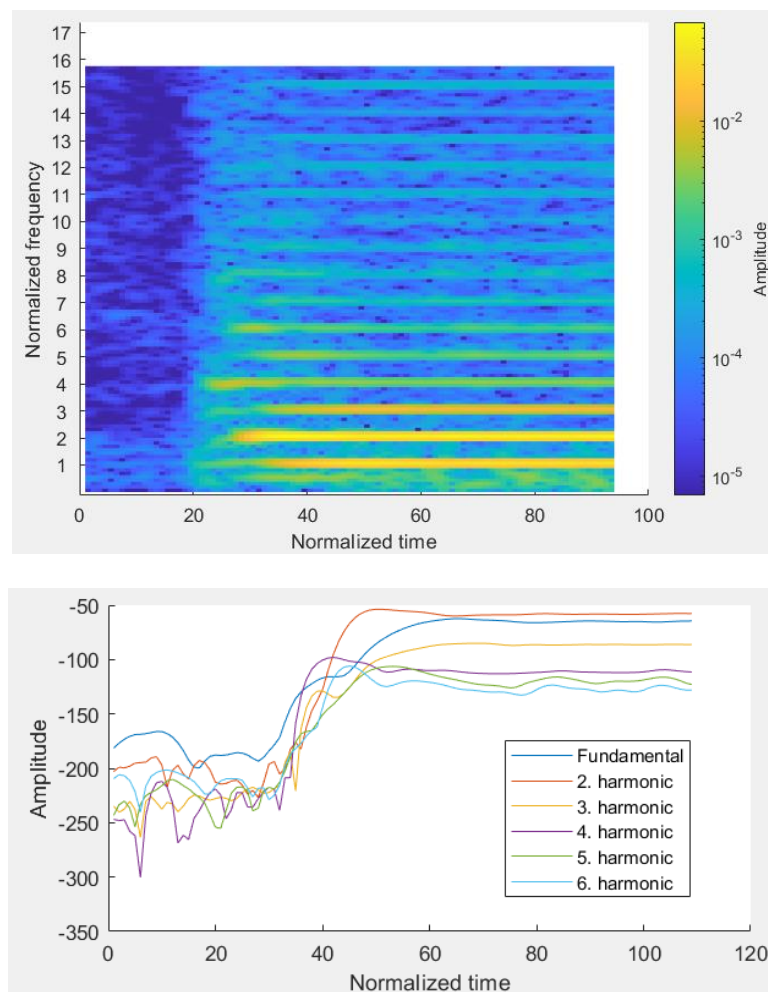
Az időben változó spektrumot spektrogrammal szokás ábrázolni. Egy kisebb, N_{window} méretű csúszó-ablakkal és valamekkora $N_{overlap}$ átlapolódással szeletekre

bontjuk az újramintavételezett jelből kiválasztott szakaszt, és minden szeleten elvégezzük az FFT műveletét. Az eredményként kapott spektrumokat egymás mellé rendezve nyomon követhetjük, hogy hogyan változik a komponensek amplitúdó-értéke az idő múlásával.

Minél nagyobbnak választjuk az ablak méretét, annál nagyobb lesz a spektrumok felbontása, de ezzel együtt romlik a spektrogram időfelbontása. Mivel a jel időbeli felbontása a mintavételi frekvenciától függ, és a spektrogram szempontjából is lényeges, hogy minél jobb legyen, az ablak méretét maximalizálnunk kell egy, a mintavételi frekvenciától függő értékkel. Ehhez egy jó választás a mintavételi frekvencia meghatározásánál használt $R = 2^n$ értékhez igazodva az csúszó-ablak maximális méretét 2^{n+3} mintának venni. Mivel az újramintavételezést a pontos alapfrekvenciát felhasználva, koherens módon végeztük el, kis ablakméret mellett is elkerülhetjük a léckerítés-hatást.

Az átlapolódás mértékét növelve tovább javítható a spektrogram időfelbontása. Az értéket $\frac{1}{2}$ -nek, $\frac{3}{4}$ -nek vagy $\frac{7}{8}$ -nak érdemes megválasztani. A $\frac{7}{8}$ -nál nagyobb átlapolódás már nem javít jelentősen az időfelbontáson.

Az egymást követő spektrumokat sorba rendezve, és a kapott mátrix elemeit értékük szerint kiszínezve jeleníthetjük meg a spektrogramot. [10, pp. 5] A harmonikus komponensek amplitúdó-változása megfigyelésének másik módja, ha az egyes komponensek frekvenciájához tartozó hangosság-értékeket külön görbéken ábrázoljuk az idő függvényében. [6, pp. 619] A két megoldás a 3.7-es ábrán látható. Az utóbbi ábrázolási forma jobban szemlélteti a komponensek felépülésének sorrendjét, így nagyobb segítséget nyújt az intonatőrök munkájához.



3.7 ábra: A harmonikus komponensek amplitúdó-változása spektrogramon (fent) és különálló görbéken (lent) a felfutástól a kitartásig

4 A feladat megoldása

4.1 A program specifikációja

A feladat megoldásaként elkészített szoftverem elé az alábbi követelményeket támasztottam:

- Kerüljenek implementálásra az előző részben tárgyalt feldolgozási módszerek, melyekkel megvalósítható a felhasználó által megadott hangfelvételek elemzése és kiértékelése.
- Rendelkezzen grafikus felülettel, amely felhasználóbarát munkakörnyezetet teremtet.
- Az egyes felvételek kiértékelésén túl legyen lehetőség a számítási eredmények összehasonlítására is.
- A felület legyen képes egymástól elkülönülő projektek kezelésére, melyek állapota elmenthető és beolvasható.

A megoldáshoz a Matlab nyelvet választottam, a számításban és a grafikus felület fejlesztésében jól használható tulajdonságai miatt.

A program .wav kiterjesztésű hangfájlokat vár a felhasználotól. A WAV egy tömörítetlen audio-formátum, amely a felvétel mintavételi frekvenciáját és a minták tömbjét tartalmazza. A számítás sikeressége érdekében a felvételek lehetőleg jó jel-zaj viszony mellett készüljenek, a síp megszólalásának egészét tartalmazzák, csenddel a felfutás előtt és a lecsengés után. A mikrofonokat az ajaksípok esetében az ajkakhoz, nyelvcsipoknál pedig a síp nyitott végéhez helyezzük közel, hogy a felfutás minél kivehetőbb legyen a felvételen. Arra is figyeljünk, hogy a mikrofon ne álljon az áramlás útjában. A szakaszszétválasztás és a spektrális elemzés érdekében a kitartás ideje legalább pár másodperces legyen.

4.2 A program architektúrája

A Matlab környezet lehetőséget nyújt az objektum orientált fejlesztésre is, amit kihasználtam a feladat megoldása során. Ezen alfejezet a létrehozott osztályokat és a közöttük lévő kapcsolatokat ismerteti.

4.2.1 Sound

Elsősorban az egyes hangfelvételekre vonatkozó adatokat és a rajtuk elvégzett számítási eredményeket foglalja magába. A 3. fejezetben tárgyalt jelfeldolgozási lépéseket megvalósító függvények is ebben az osztályban kerültek implementálásra. A felhasználó a többi osztályon keresztül a Sound adattagjait módosítja, így az mindig naprakész információval rendelkezik a hangfelvételre vonatkozó számítás állapotáról. A mentés során az osztály kiszámítható adattagjai nem kerülnek kiírásra. Az adatoknak a beolvasáskor történő visszaállítása, valamint a számítások utólagos megváltoztatása miatt az osztály tárolja az egyes jelfeldolgozási lépéseknek a felhasználó által beállított paramétereit is.

4.2.2 Calibration

A sípok valós hangerejének megadásához szükséges kalibrációs felvételt kezelő osztály. Tárolja a felvétel elérési útját, névleges frekvenciáját és hangnyomásszintjét, valamint a kiszámolt 1/Pa dimenziójú hangerő-arányt. Mivel a felhasználó bármilyen WAV fájlt megadhat kalibrációs felvételnél, a hibalehetőség csökkentése miatt érdemes kiszámolni a felvételen lévő hang frekvenciáját, és összehasonlítani a kalibrátor névleges frekvenciájával. Nagy eltérés esetén a felvétel nem használható kalibrálásra. Az eltűrt hiba maximális értékének a névleges frekvencia $\frac{1}{10}$ -ét választottam.

A felvétel helyességét ellenőrző, és a hangerő-arány számítását végző függvények is a Calibration osztályba kerültek.

4.2.3 Window osztályok

A felhasználói felületet funkciók szerint különálló ablakokra osztottam. Az egyes ablakok és részegységeik elrendezését a Dr. Fiala Péter által fejlesztett GroupLayout felületszerkesztő osztály segítségével készítettem el.

4.2.3.1 RegisterWindow

Egy projekt fő ablakának kezelője. Tárolja a sípsorhoz felvett Sound osztályokat és a projekthez tartozó Calibration osztályt. Kezeli az újrámintavételezett hangjelek spektrális centroidjának és hangosságának egységes kiszámítását, és az eredmények összehasonlítását, valamint a többi ablak szerinti nézetek megnyitására is innen van

lehetőség. A sípsor hangolásának ellenőrzéséhez szükség van egy temperált referenciaskálára, amelyet szintén a RegisterWindow tárol.

4.2.3.2 CalculationWindow

A kiválasztott hangfelvételen elvégezhető jelfeldolgozási lépéseket foglalja magába a szakaszszétválasztástól az újramintavételezésig. A számítási lépéseket kezelő grafikus felületeket a különálló StationaryPanel, HPS_Panel, FrequencyPanel és ResamplePanel osztályokban hoztam létre.

4.2.3.3 AddSoundWindow

A projekt új hangfelvétellel való bővítését kezelő ablak. A síp nevét és a hangfájl elérési útját kéri a felhasználotól, melyekből létrehozza az új Sound osztályt.

4.2.3.4 SettingsWindow

A projekthez tartozó kalibrációs felvétel kezelését és a referenciaskála hangolását teszi lehetővé.

4.2.3.5 SoundDetailsWindow

A kiválasztott Sound példányra vonatkozó pillanatnyi információkat jeleníti meg.

4.2.3.6 ProjectDetailsWindow

A sípsorra vonatkozó statisztikai információkat jeleníti meg a beállításoktól és a Sound osztályok pillanatnyi állapotától függően.

4.2.3.7 SpectrumWindow

A kiválasztott Sound példány felfutásának vizsgálatát kezelő TransientPanel és TransientSpectrumPanel osztályokat foglalja magába.

4.2.3.8 NewProjectWindow

Új regiszter felvételénél létrejövő ablak. A projekt nevét várja a felhasználotól, és a könyvtár elérési címét, ahova a mentést követően kerül.

4.2.4 Panel osztályok

Az összetettebb ablakokat panelekre osztottam az egyszerűbb kezelés és a hatékonyabb fejlesztés érdekében.

4.2.4.1 StationaryPanel

A kiválasztott Sound példány amplitúdó-burkolójának megjelenítéséért és a kitartott szakasz határainak beállításáért felel a felhasználó módosításainak megfelelően.

4.2.4.2 HPS_Panel

A kiválasztott Sound példány kitartott szakaszán elvégzi a HPS-számítást a felhasználó által beállított lépésszámmal. Kezeli a módosított spektrum és a becsült frekvenciaérték megjelenítését.

4.2.4.3 FrequencyPanel

A kiválasztott Sound példány kitartott részén a felhasználó által beállított ablakmérettel és átlapolódással több szakaszon elvégzi a frekvenciamérést. Megjeleníti a számítási eredmények minimális, maximális és átlag-értékét, valamint az értékek szórását is.

4.2.4.4 ResamplePanel

A kiválasztott Sound példányon a felhasználó által beállított felbontási tényező mellett elvégzi az újramintavételezést, valamint jelzi a számítás sikerességét.

4.2.4.5 TransientPanel

Az újramintavételezett jel amplitúdó-burkolójának a túllövésig tartó megjelenítését és a felfutásnak a felhasználó által kiválasztott határai rögzítését kezeli.

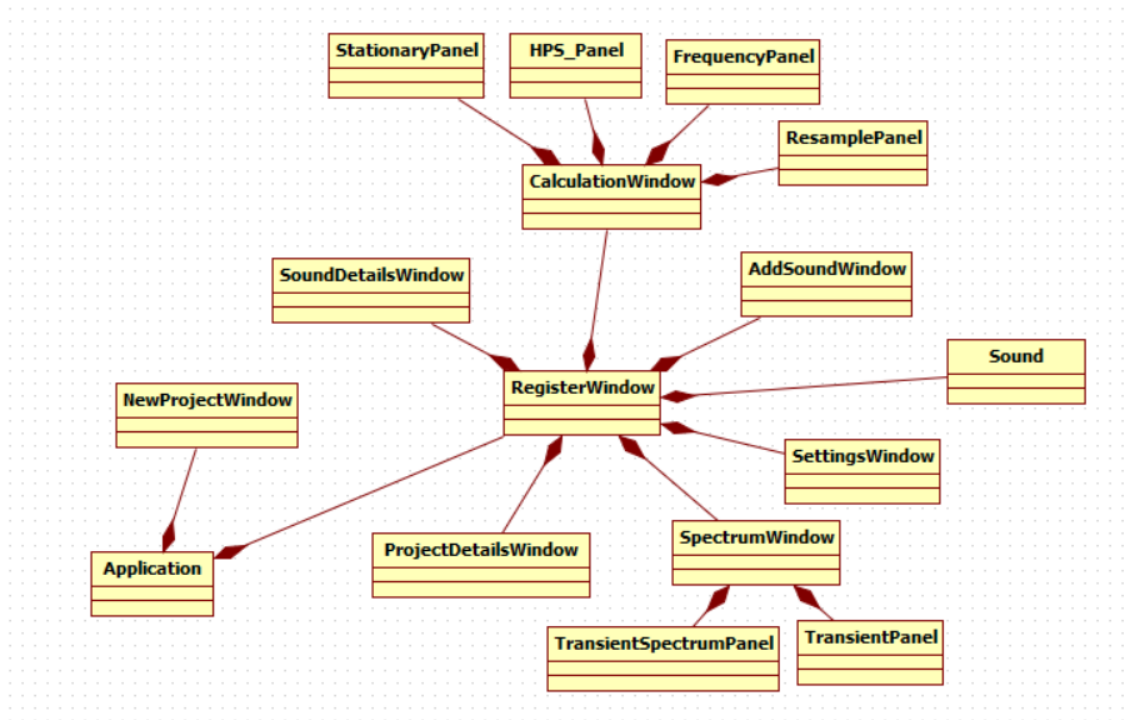
4.2.4.6 TransientSpectrumPanel

A felhasználó által kiválasztott ablakméret, átlapolódás és harmonikusszám mellett megjeleníti az újramintavételezett jel felfutásának spektrogramját és a harmonikusok amplitúdó-változásának görbéit. A felhasználó opcionálisan beállíthatja, hogy a túllövést követően a jel hány másodpercnyi szakasza kerüljön még megjelenítésre.

4.2.5 Application

Az alkalmazás indításáért és a projektek kezeléséért felelős osztály. Innen van lehetőség új regiszter felvételére, vagy már létező projekt betöltésére.

Az osztályok viszonyát a 4.1-es ábra szemlélteti.



4.1 ábra: Az alkalmazás egyszerűsített osztálydiagramja

4.3 Logikai felépítés

A jelfeldolgozási lépéseknek a 3. fejezetben tárgyalt működése miatt a következő szigorú sorrendet kell betartanunk a vizsgált jel valós értékek kinyerésére alkalmas állapotába hozásához:

1. A jel amplitúdó-burkolójának kiszámítása
2. A kitartott szakasz határainak kijelölése a burkoló alapján
3. A kitartott szakasz spektrumának kiszámítása FFT-vel
4. Alaphang frekvenciájának becslése a HPS-módszer segítségével
5. Frekvenciamérés a kitartott szakaszon a becslés eredményének felhasználásával
6. Koherens mintavételi frekvencia előállítása az alaphang pontos frekvenciájának ismeretében
7. Újramintavételezés az előállított mintavételi frekvenciával

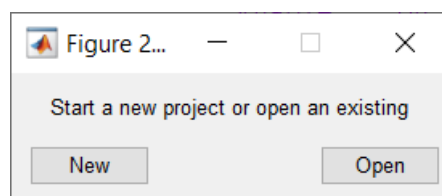
A sorrend betartása mellett érdemes biztosítani a felhasználó számára annak a lehetőségét, hogy a korábbi számításokat más paraméterekkel újra elvégezhesse. Mindkét feltétel teljesítését úgy oldottam meg, hogy a StationaryPanel, HPS_Panel,

FrequencyPanel és ResamplePanel osztályokat egy láncolt listába rendeztem. A StationaryPanel kivételével minden listaelem kerülhet engedélyezett vagy letiltott állapotba. Ha egy panel tiltott állapotban van, a grafikus elemei nem reagálnak a felhasználói interakcióra. Az engedélyezéssel a felületi elemek újra használhatóvá válnak. Alap esetben minden letiltható panel tiltott állapotban van, engedélyezetté akkor válik, amikor az azt megelőző elemen elvégezte a számítást a felhasználó. Ha a felhasználó egy korábban használt panelen újra számítást hajt végre, a lista későbbi elemeihez kapcsolódó adattagok érvénytelenné válnak a kezelt Sound osztályban, és az újra használt panelt követő elem kivételével minden későbbi panel letiltott állapotba kerül. Ehhez az elvhez hasonlóan a TransientSpectrumPanel is csak akkor válik engedélyezetté, ha a TransientPanel-en a felhasználó már kijelölte a felfutás szakaszát.

Az újramintavételezett jelen már egymástól függetlenül kiszámíthatók a síp hangossága és spektrális centroidja, továbbá a spektrogram segítségével a felfutás karakterisztikáját is megfigyelhetjük.

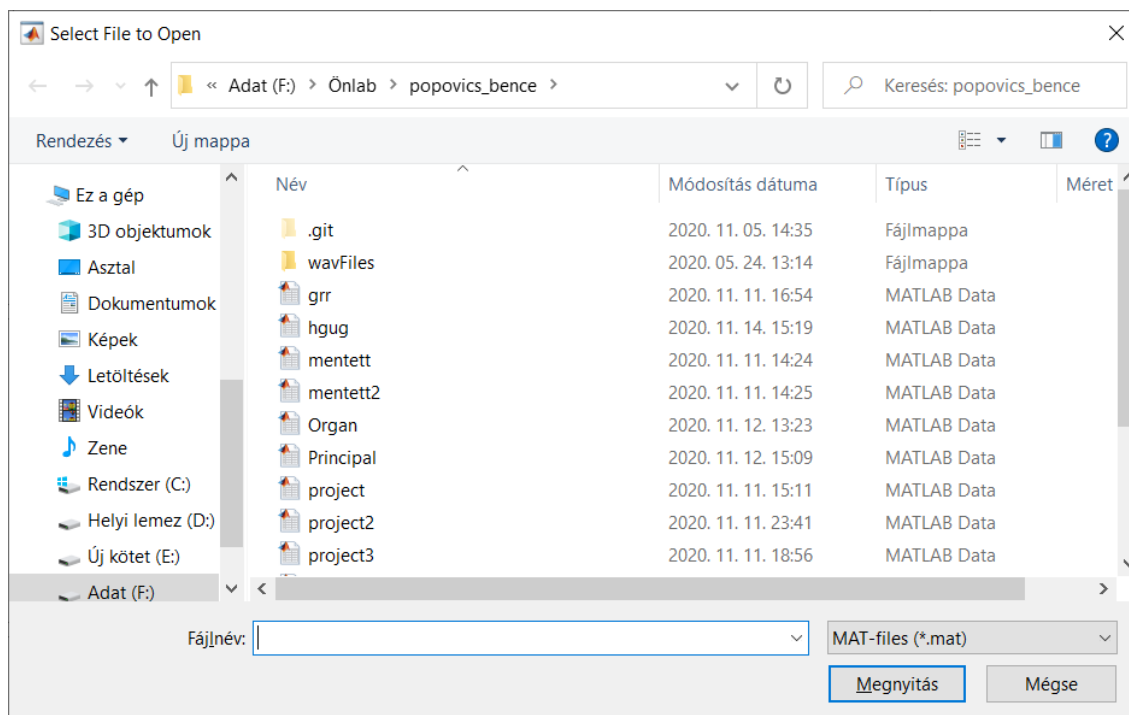
4.4 A program működése

A Matlab alkalmazás az *Application* futtatásával indul. Ekkor megjelenik a 4.2-es ábrán látható indító ablak. Innen az *Open* vagy a *New* feliratú gomb segítségével léphetünk tovább.



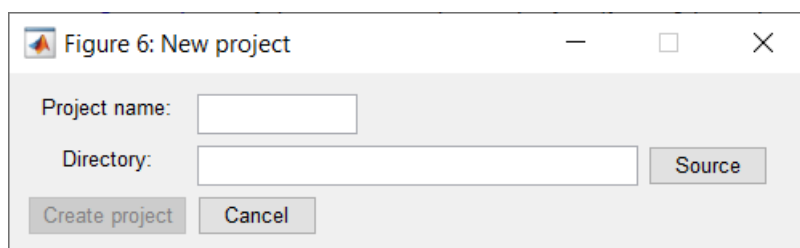
4.2 ábra: Az alkalmazás indító ablaka

Az *Open* gombra kattintva megnyílik a fájlkezelő, ahol a felhasználó kiválaszthatja, hogy melyik korábban elkészült projektet akarja megnyitni, a 4.3-as ábrán látható módon. A rendszer egy .mat kiterjesztésű fájlt vár, aminek a tartalma egy, a betöltés logikájának eleget tevő struktúra. Ha a választott fájl eleget tesz a feltételeknek, az alkalmazás megnyitja a munkakörnyezetet, és betölti a választott projekt adatait.



4.3 ábra: Fájlkezelő létező projekt megnyitásához

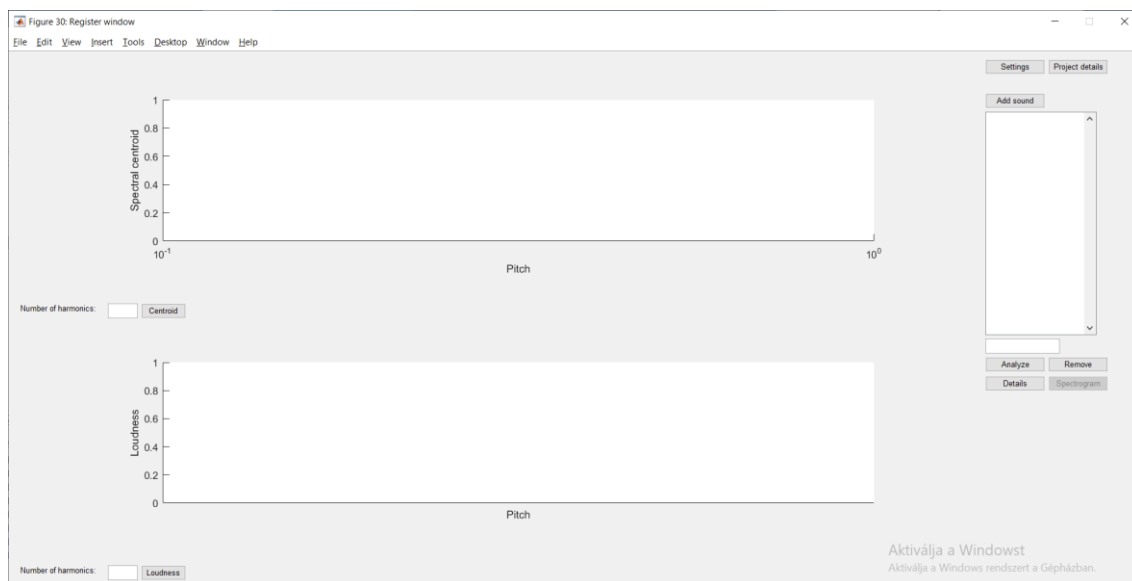
A *New* lehetőséget választva megjelenik a 4.4-es ábrán látható, új projekt létrehozását kezelő ablak. Új projekt létrehozásához a felhasználónak meg kell adnia a projekt nevét, és a könyvtár elérési útját, ahova a mentést követően kerül majd. Ezeket a *Project name* és a *Directory* mezők kitöltésével teheti meg. A könyvtár helyének kitöltését nem muszáj kézzel elvégezni, a *Source* feliratú gombra kattintva megnyílik a fájlkezelő, amivel kényelmesebben kiválasztható a célhely.



4.4 ábra: Ablak új projekt létrehozásához

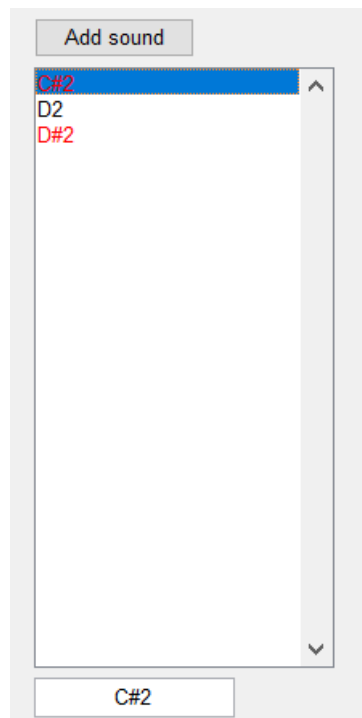
Ha egyik mező sem üres, engedélyezetté válik a *Create project* feliratú gomb, mellyel létrejön az új projekt és bezárul az ablak. A *Cancel* lehetőséget választva új projekt létrehozása nélkül zárul be az ablak.

A projekt létrehozását vagy betöltését követően megnyílik a 4.5-ös ábrán látható munkakörnyezet. A vizsgált regiszter egészére vonatkozó, és az egyes hangokat kezelő funkciók mindegyike ebből az ablakból érhetők el.



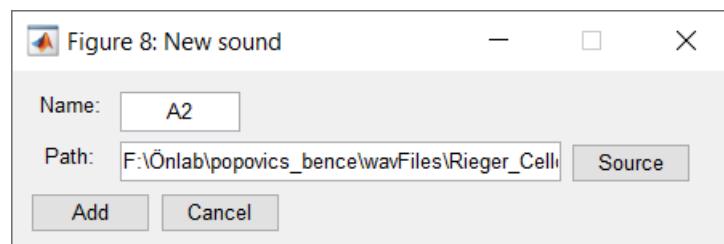
4.5 ábra: A létrehozott projekt munkakörnyezete

Az ablak jobb oldalán található a sípsor hangjait tároló gördülő lista. A hangokat a felhasználó által megadott nevük azonosítja, és a listában is ezek alapján választhat közülük. A listából aktuálisan kiválasztott elem neve a lista alatti szövegdobozban jelenik meg. Az újonnan felvett hangok neve piros színnel jelenik meg a listában, és feketére színeződnek, ha el lett végezve rajtuk az újramintavételezés. A színkódolás segíti az újramintavételezésre váró hangok könnyű megtalálását, ugyanis csak ezekhez rendelhetők a hangosságot és a hangszínt meghatározó értékek. A lista nagyított képe néhány felvett hanggal a 4.6-os ábrán szerepel.



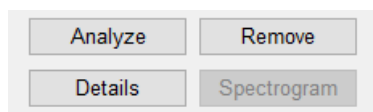
4.6 ábra: A hangok listája néhány felvett hanggal. Csak a D2-höz tartozó felvétel került újrámintavételezésre

Új hang a lista fölött lévő *Add sound* gomb megnyomásával adható hozzá a projekthez. A gombnyomás hatására megnyílik a 4.7-es ábrán látható *New sound* nevezetű ablak, amely bekéri a felhasználótól a hozzáadni kívánt hang nevét, és a hozzá tartozó WAV fájl elérési útját a fájlrendszerben a *Name* és a *Path* mezők kitöltésével. A felvétel helye kézzel, vagy a *Source* gombra kattintva a fájlkezelőből is megadható. A kiválasztott név azonosítja a hangot, a rá vonatkozó számítási műveletek pedig a hangfelvételen kerülnek majd elvégzésre. Ha egyik mező sem üres, engedélyezetté válik az *Add* gomb, melynek megnyomásával az újonnan létrehozott hang hozzáadódik a projekthez, és bezárul a *New sound* ablak. A *Cancel* lehetőséget választva meghiúsul a hang hozzáadásának kísérlete, és a projekt korábbi állapotát változatlanul hagyva bezárul a *New sound* ablak. Az új hang neve a hangok listájának végére kerül.



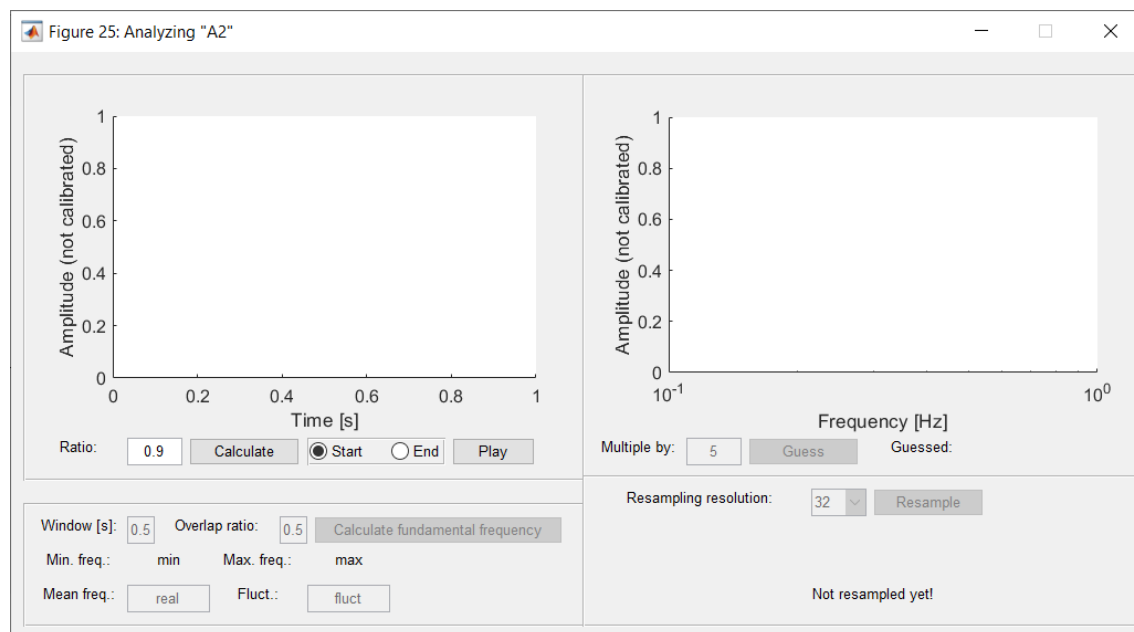
4.7 ábra: Az egy hangnak a projekthez való hozzáadását kezelő New sound ablak

A kiválasztott hangot jelző szövegdoboz alatt található négy gombbal az egyes hangokra vonatkozó funkciók érhetők el. A funkciók a mindenkor kiválasztott elemre vonatkoznak. A gombok nagyított képe a 4.8-as ábrán látható.



4.8 ábra: Az egyes hangokhoz tartozó funkciók gombjai

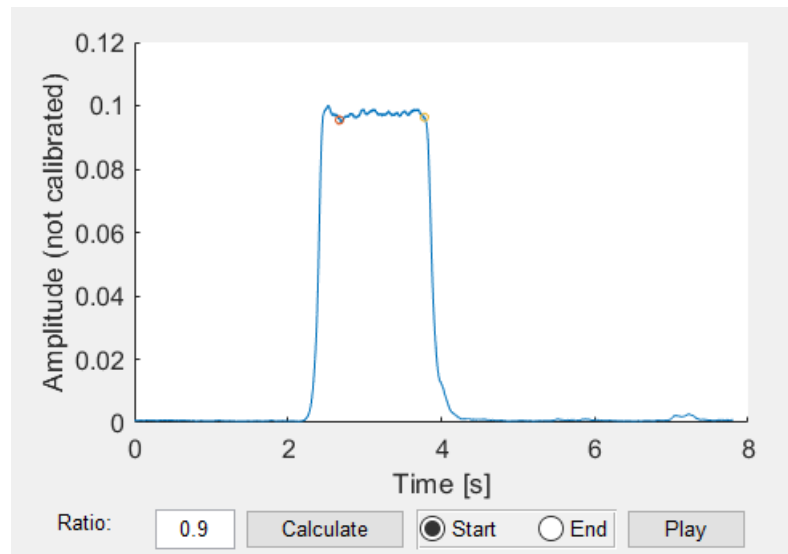
Az *Analyze* gombot megnyomva megnyílik egy *Analyzing „[választott hang neve]”* nevezetű ablak, amely négy panelre osztva az újramintavételezésig tartó jelfeldolgozási lépéseket valósítja meg. Első megnyitás esetén csak az első panel aktív, az összes többi az azt megelőző számítás végeztével válik azzá, ahogy a 4.9-es ábrán is látható.



4.9 ábra: Az 'A2' hang analízisének ablaka első megnyitáskor

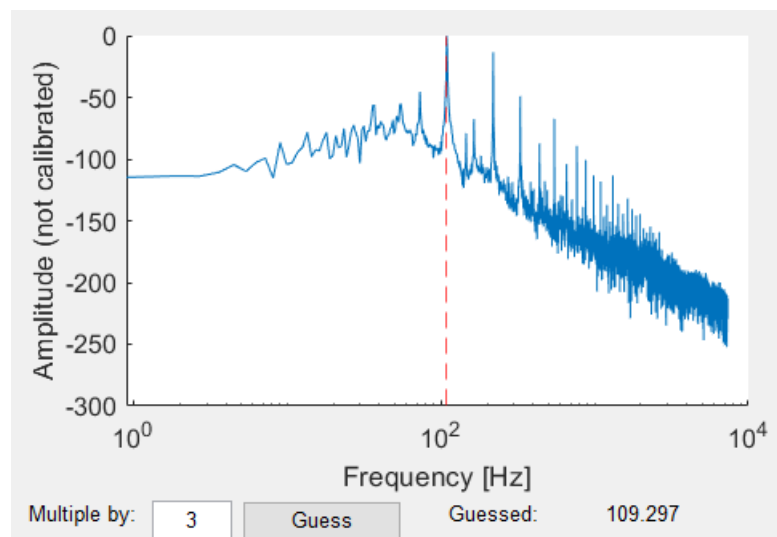
Az első panelen a hang amplitúdóburkolójának kiszámítása és a kitartott szakasz kiválasztása valósítható meg. A panel elrendezését a 4.10-es ábra szemlélteti. A burkoló számításához a felhasználónak meg kell adnia egy $0 < n < 1$ tizedes törtet a *Ratio* mezőben, majd rá kell kattintania a *Calculate* feliratú gombra. A rendszer kiszámolja a burkoló függvényét, és automatikusan megadja a kitartott szakasz határait. Az automatikusan megválasztott szakasz elejét a túllövés helyének, a végét pedig a felvétel azon pontjának veszi, ahol a túllövés értékének n -szerese alá esik a burkoló értéke. Azaz a kitartott szakasz a túllövéstől kezdve addig tart, ameddig a burkoló egy adott

küszöb fölötti értékeket vesz fel. A panel a számítást követően megjeleníti a burkológörbét, és pontokkal jelöli rajta a kitartott szakasz határait. A rendszer által adott ajánlás az amplitúdó ingadozása miatt nem mindig ad kielégítő eredményt, ezért biztosított a felhasználó számára a határok manuális módosítása. Az ábra alatt található *Start* és *End* kapcsolók állásától függően az egérrel a grafikon adott pontjára kattintva módosíthatók a szakasz határai. Hogy megbizonyosodhasson a választott szakasz helyességéről, a felhasználó a kapcsolók mellett található *Play* gombbal meghallgathatja, hogy hogy szól a felvétel a választott helyen.



4.10 ábra: Az első panel nagyított képe a kiszámolt burkolóval és a kitartott szakasz határaival

A kitartott szakasz határainak megválasztását követően aktiválódik a 4.11-es ábrán is látható jobb oldali panel, ahol a HPS-módszerrel megadható frekvenciabecslés történik. A felhasználó a *Multiple by* mező kitöltésével megadhatja, hogy hány lépésben fusson az algoritmus, majd a *Guess* felíratú gombbal indíthatja el a számítást. A becslés eredménye a gombtól jobbra található *Guessed* felíratnál jelenik meg, az ábrán pedig az algoritmus végén kapott spektrum képe rajzolódik ki. Az eredmény használhatóságának ellenőrzése miatt a grafikonon piros szaggatott vonal jelzi a becsült harmonikus frekvenciáját. A felhasználó ennek segítségével könnyen leolvashatja, hogy a számítás az alaphangra, vagy valamelyik felhangra mért rá. Amennyiben az eredmény nem az alaphangra vonatkozó becslés, az algoritmust nagyobb lépésszám mellett újra el kell végezni.



4.11 ábra: A második panel nagyított képe a háromlépéses HPS kimeneti spektrumával és a becslés eredményével

A becslés eredményével érvényessé válik a 4.12-es ábrán is látható harmadik panel, amely a frekvenciamérést valósítja meg. A program a kitartott szakaszt kisebb ablakokra bontva mindegyiken elvégzi a frekvenciamérést, és a statisztikai eredményekről visszajelzést ad. A felhasználó a *Window* mezőben megadhatja, hogy hány másodperc hosszú legyen egy ablak, az *Overlap ratio* mezőben pedig az átlapolódás együtthatóját választhatja meg. A megfelelő értékek megadását követően a *Calculate fundamental frequency* feliratú gombra kattintva lefut a számítás. A *Min. freq.*, *Max. freq.*, *Mean freq.* és *Fluct.* mezőknél rendre az ablakokon számított minimális, maximális és átlagos frekvenciaértékek, valamint az eredmények szórása jelenik meg. A rendszer az átlagos frekvenciaértéket fogja az alaphang pontos frekvenciájaként használni.

Window [s]:	<input type="text" value="0.5"/>	Overlap ratio:	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="button" value="Calculate fundamental frequency"/>
Min. freq.:	109.6537	Max. freq.:	109.6812	
Mean freq.:	<input type="text" value="109.6656"/>	Fluct.:	<input type="text" value="0.014109"/>	

4.12 ábra: A harmadik panel nagyított képe a mérés statisztikai eredményeivel

A pontos frekvencia ismeretében elvégezhető az újramintavételezés, melyet a 4.13-as ábrán is látható negyedik panelen hajthat végre a felhasználó. A *Resampling resolution* feliratú dobozban választhatja ki a felhasználó, hogy a koherens mintavételi frekvencia az alaphang frekvenciájának hányszorosa legyen. A 32, 64 és 128 értékek közül választhat. A szorzó tényező kiválasztása után a *Resample* feliratú gomb

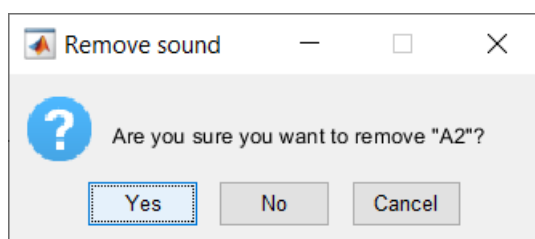
megnyomásával lefut az újramintavételezés. A panel alján lévő felirat tájékoztatja a felhasználót az újramintavételezés állapotáról.



4.13 ábra: A negyedik panel nagyított képe az alaphfrekvencia 128-szorosával történt sikeres újramintavételezés után

A számításokat kezelő ablak bezárásával a számítási eredmények és a felhasználó beállításai is elmentésre kerülnek, így a későbbi megnyitás alkalmával ugyanazt az állapotot veszi fel az ablak, amivel be lett zárva. Az ablak bezárása közben a rendszer megvizsgálja, hogy a hangon el lett-e végezve az újramintavételezés. Amennyiben igen, a projekt ablakán lévő listában fekete színnel jelenik meg a neve. Egyébként pirosra színezi a rendszer.

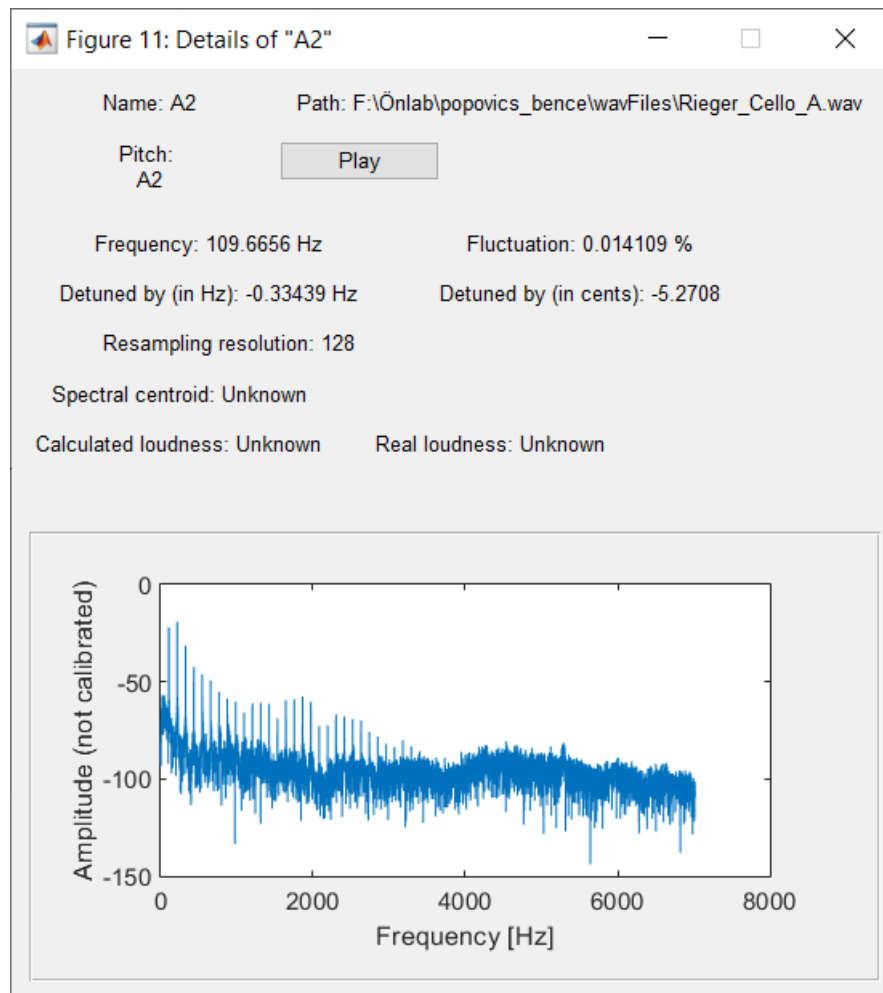
A kiválasztott hang a *Remove* gombbal távolítható el a regiszter listájából. A gombra kattintva megjelenik a 4.14-es ábrán is látható dialógusablak *Remove sound* névvel, az *Are you sure you want to remove "[hang neve]"?* kérdéssel, valamint a *Yes*, *No* és *Cancel* opciókkal. Eltávolítási szándékát a *Yes*-el erősítheti meg a felhasználó. Ilyenkor a hang kikerül a projekt listájából. A többi opciót választva a törlés kísérlete megghiúsul.



4.14 ábra: A hang törlésekor felugró dialógusablak

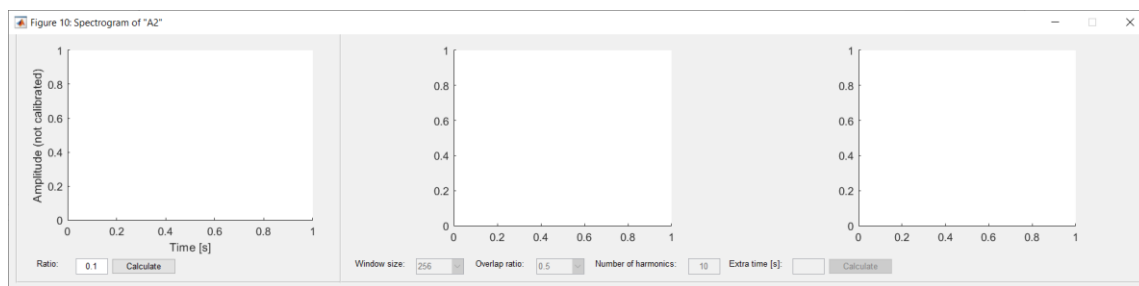
A *Details* funkciót választva a megnyílik a 4.15-ös ábrán is látható *Details of „[választott hang neve]”* ablak, ahol a kiválasztott hangra vonatkozó adatok olvashatók le. Az ablak megjeleníti a hang nevét, elérési útját, a referenciaskála szerinti zenei hangját, a pontos alaphfrekvenciáját, a fluktuációját, a hertz-ben és centben mért hamisságát a referenciaskálához viszonyítva, az új mintavételi frekvenciájának együtthatóját, a spektrális centroidja értékét, valamint a felvételtől számított és a

kalibrációval pontosított hangosság-értéket. Az ismeretlen értékeket *Unknown*-nal helyettesíti a program. Továbbá van egy *Play* feliratú gomb az ablakon, amivel meghallgatható a teljes hangfelvétel, és egy grafikon, amin a hang újramintavételezett spektruma kerül ábrázolásra. Ha a hangon nincs elvégezve az újramintavételezés, a grafikon üres marad.



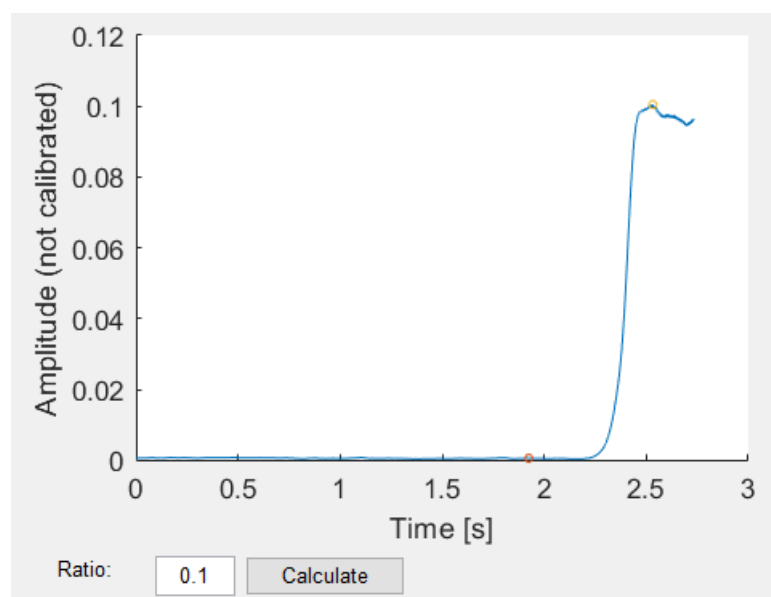
4.14 ábra: Az 'A2' hang tulajdonságait megjelenítő ablak

Amennyiben a kiválasztott hang újra lett mintavételezve, érvényessé válik a *Spectrogram* feliratú gomb, mellyel a hang spektrogramja vizsgálható meg. A gombra kattintva megnyílik a 4.15-ös ábrán is látható *Spectrogram of „[választott hang neve]”* ablak, ami két panelre bomlik.



4.15 ábra: A spektrogramot kezelő ablak

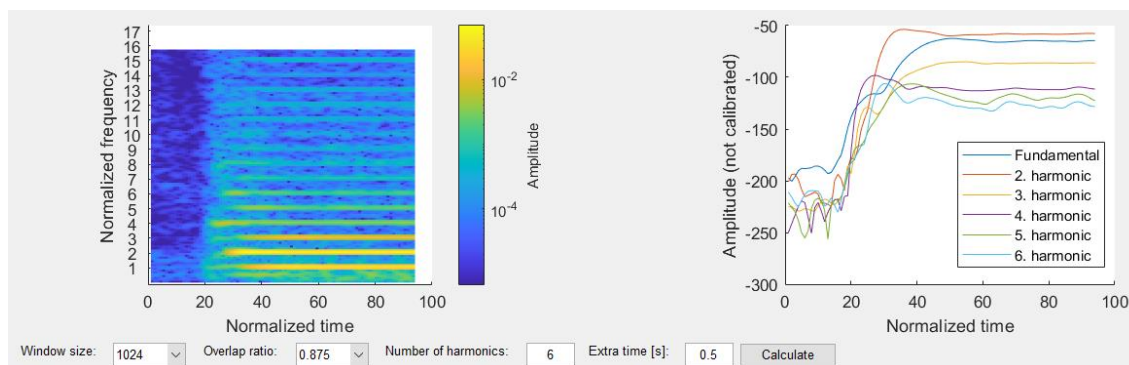
Az első panelen a felhasználó kiválaszthatja a hang felfutásának határait az analízisnél tárgyalt, kitartás szakaszát számító panelhez hasonlóan. A különbség annyi, hogy itt a szakasz végpontja stabilan a túllövés helye, és a kezdőpontja helyének számításához van szükség az arányszámra. A *Calculate* feliratú gombra kattintva a grafikonon megjelenik az amplitúdóburkolónak a felvétel elejétől a túllövésig tartó szakasza, a határok helyét jelző pontokkal. A felhasználó a grafikon adott pontjára kattintva módosíthatja a felfutás kezdetét. A panel nagyított képe a 4.16-os ábrán látható.



4.16 ábra: Az első panel felnagyított képe a felfutás burkolójával és a szakasz határaival

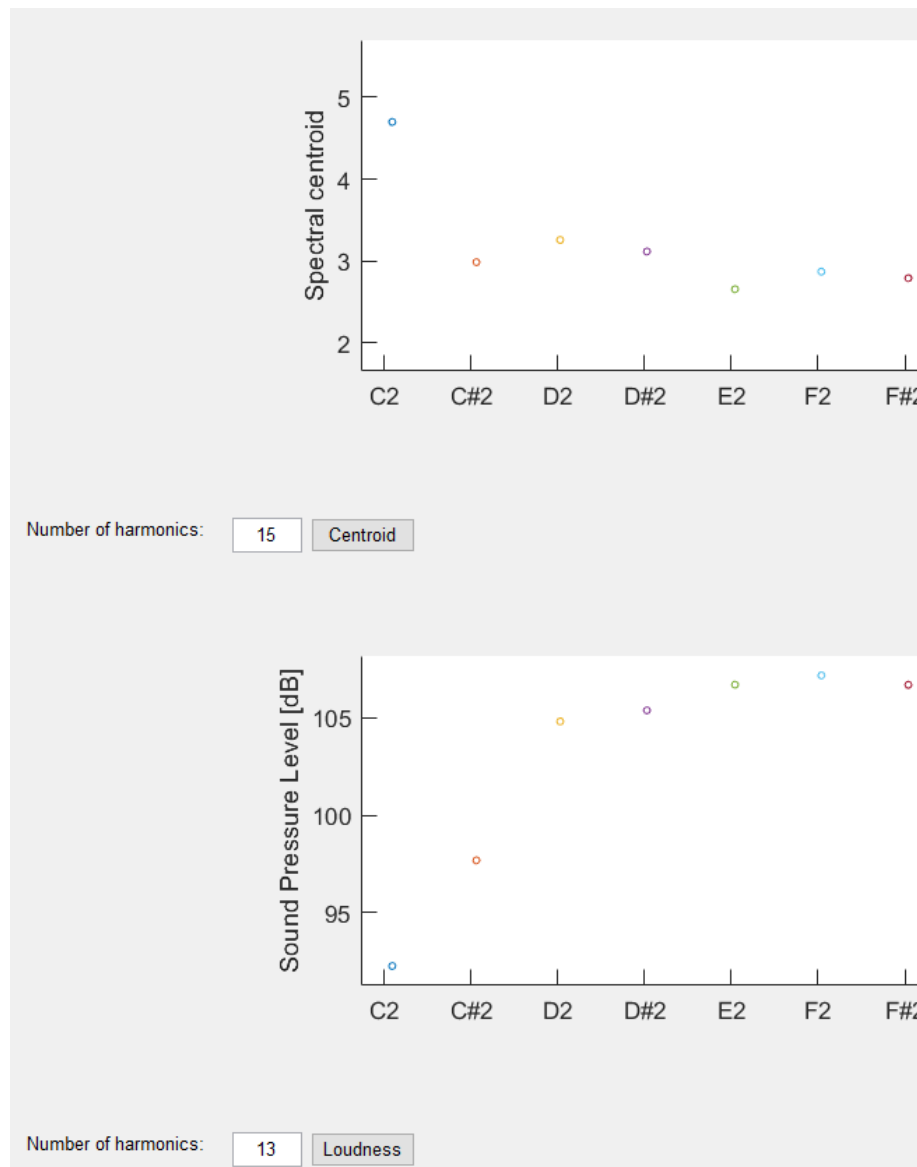
A felfutás szakaszának megválasztását követően érvényessé válik a 4.17-es ábrán is látható második panel, ahol a spektrogram és a harmonikusok különálló amplitúdó-változása ábrázolható. A felhasználó az egymás mellett lévő mezőkön kiválaszthatja az ablakméretet, az átlapolódás mértékét, és megadhatja, hogy a független görbék ábrázolásánál hány felhangot szeretne megfigyelni. Opcionálisan beállítható,

hogy a vizsgálat a túllövés utáni szakaszból hány másodpercet foglaljon még magába. Ez azért lehet hasznos, mert így nem csak a felfutás figyelhető meg, hanem a hang kitartott részével is összekapcsolható. A paraméterek megadását követően a *Calculate* feliratú gombra kattintva a panel két ábráján megjelenik a spektrogram és a harmonikusok amplitúdó-görbéi. A kívánt eredmény eléréséhez érdemes az ablakméret és a harmonikusok számának megválasztásakor figyelembe venni az koherens mintavételi frekvencia együtthatóját.



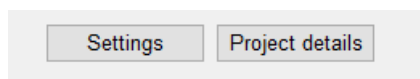
4.17 ábra: A második panel felnagyított képe a felfutás ábrázolásának két változatával

A projekt ablakának közepén helyezkedik el a 4.18-as ábrán is látható két nagy grafikon. A felső a sípsor hangjainak centroid-, az alsó pedig a hangosság-értékeit hivatott megjeleníteni. Az ábrák alatt lévő *Number of harmonics* mezőkön a felhasználó beállíthatja, hogy a számításba hány harmonikus komponenst kíván belevenni, a mezők mellett lévő *Centroid* illetve *Loudness* gombokkal pedig a program a regiszter összes újrámintavételezett hangján elvégzi a megfelelő értékre vonatkozó számítást, és az eredményeket megjeleníti az ábrán. Az y-tengelyeken az számítási eredmények kerülnek felvételre, az x-tengelyek pedig a referenciaskála szerinti zenei hangokat mutatja. Mivel mindkét vizsgált érték a használt harmonikusok számától függ, az összehasonlításnak akkor van értelme, ha ez a szám minden hang esetében megegyezik, ezért elegendő az összes hang centroid- és hangosság-értékének számítását együtt kezelni. Az ábrák jól szemléltetik az értékek változását a sípsoron, a referenciaskála segítségével pedig ellenőrizhető a hangolás.

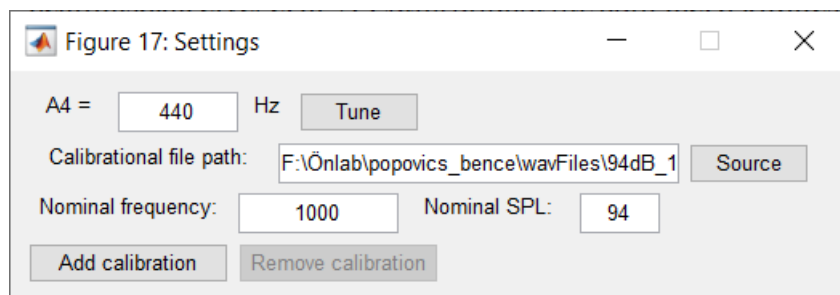


4.18 ábra: A hangok hangszínének és hangosságának összehasonlítására szolgáló grafikonok nagyított képe néhány vizsgált hanggal és a számításba vett harmonikusok számával

A projekt egészére vonatkozó funkciók a 4.19-es ábrán is látható, a hangok listája fölött elhelyezkedő gombokkal érhetők el. A *Settings* feliratú gombra kattintva megnyílik a 4.20-as ábrán is látható, a regiszter egészére vonatkozó beállításokat kezelő ablak. A felhasználó az *A4* mezőn beállíthatja, hogy a hangoláshoz használt egyvonalas *A* zenei hang mekkora frekvenciával szóljon. Alapértelmezett értéke 440 Hz. A *Tune* gombra kattintva a választott rezgésszámnak megfelelően áthangolódik a referenciaskála.

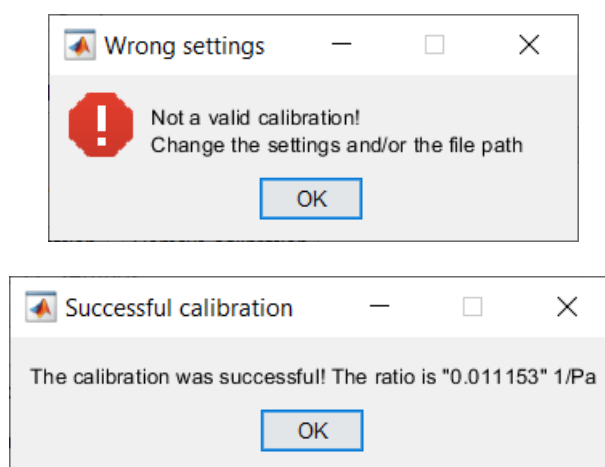


4.19 ábra: A projekt funkcióit elérő gombok nagyított képe



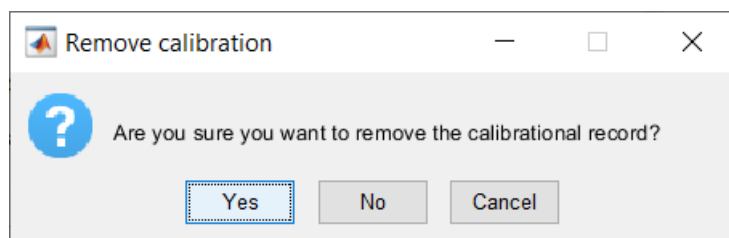
4.20 ábra: A beállításokat kezelő ablak a kalibrációs felvétel beállításaival

Ugyanezen az ablakon tudja a felhasználó a kalibrációs felvételre vonatkozó beállításokat is elvégezni. A *Calibrational file path* mező kitöltésével vagy a *Source* gomb hatására megnyíló fájlkezelővel adható meg a kalibrációs felvétel elérési útja. A felvétel névleges frekvenciája és hangnyomásszintje a *Nominal frequency* és a *Nominal SPL* mezők kitöltésével adhatók meg. Amennyiben a három közül egyik mező sem üres, érvényessé válik az *Add calibration* feliratú gomb, melynek hatására lefut a kalibrációs felvétel helyességének ellenőrzése. Amennyiben a rendszer nem találta megfelelőnek a felvételt a megadott beállításokkal, egy dialógusablakban jelzi a hibát, és megkéri a felhasználót a paraméterek módosítására. Ha az adott beállításokkal számolva a felvétel helyesnek bizonyul, a program kiszámolja a hangerő-arányt, és dialógusablakban értesíti a felhasználót a művelet sikeréről. A dialógusablakokat a 4.21-es ábra szemlélteti.



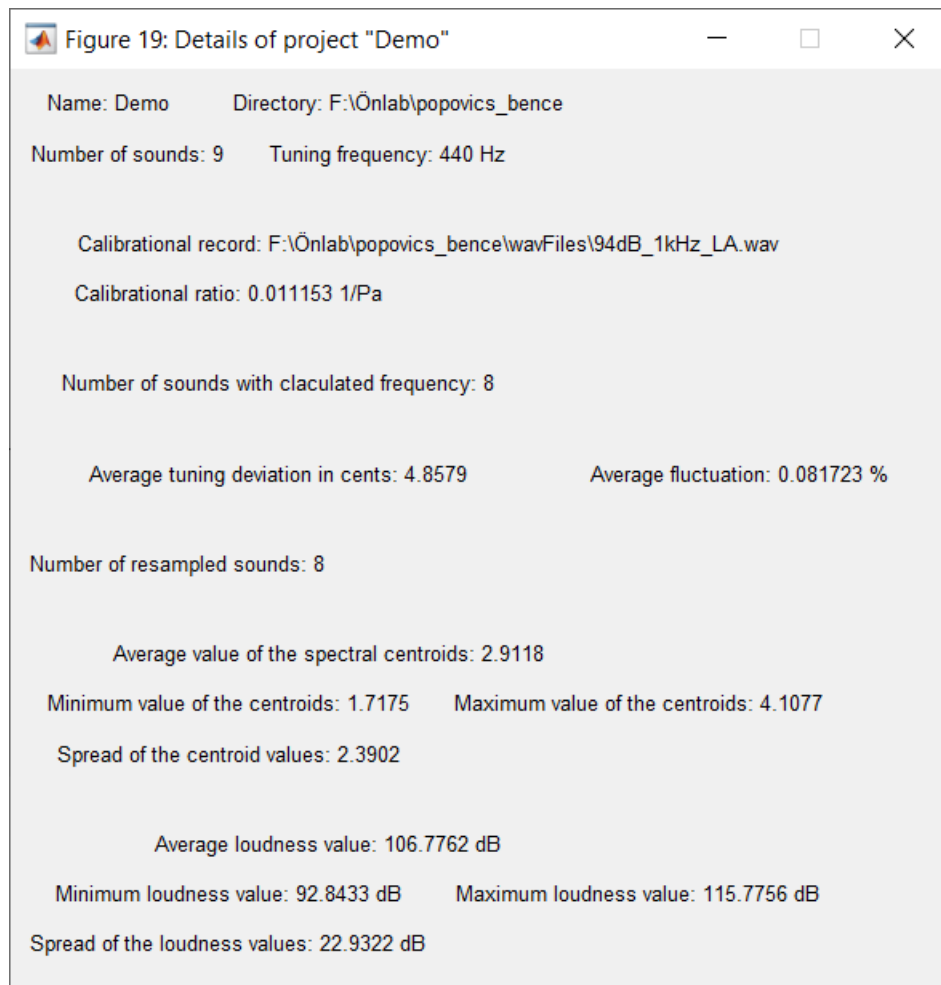
4.21 ábra: A sikertelen- (fent), és sikeres (lent) kalibráció esetén megjelenő dialógusablakok

A sikeresen felvett kalibrációt követően az *Add calibration* gomb felirata *Change calibration*-re változik. A jelenlegi felvétel kicserélhető egy új kalibrációval, a hozzáadáshoz hasonló módon. Ha van érvényes kalibrációs felvétele a projektnek, a sípok hangosságát mutató ábra a hangerő-arányt felhasználva a valódi hangnyomásszintnek megfelelő értékeket veszi fel. A felvétel a *Remove calibration* gombbal távolítható el. A művelet megerősítéséhez a program feldob egy, a 4.22-es ábrán is látható *Remove calibration* nevű, *Are you sure you want to remove the calibrational record?* feliratú dialógusablakot, melynek a *Yes* lehetőségét választva törlődik a kalibrációs felvétel. A többi lehetőséggel megghiúsul a törlési kísérlet.



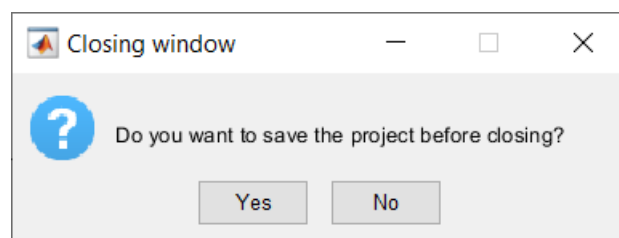
4.22 ábra: A kalibrációs felvétel eltávolításakor megjelenő dialógusablak

A projekt *Project details* gombjára kattintva megnyílik a 4.23-as ábrán is látható *Details of project „[projekt neve]”* ablak, ahonnan a regiszterre vonatkozó statisztikai és adminisztrációs adatok olvashatók le. Az ablak a projekt nevét, elérési útját, a regiszterbe felvett hangok számát, a hangolási frekvenciát, a kalibrációs felvétel elérési útját, a kalibrált hangerő-arányt, illetve a hangolás hibájának átlagát, a hangszínre és hangosságra vonatkozó értékek statisztikai adatait, valamint a különböző számítási állapotokban lévő hangok számát jeleníti meg.



4.23 ábra: A projekt adminisztratív- és statisztikai információit megjelenítő ablak

A projekt bezárásakor felugrik egy, a 4.24-es ábrán is látható *Closing window* nevű dialógusablak a *Do you want to save the project before closing?* felirattal. A *Yes* lehetőséget választva a projekt adatai a létrehozásnál megadott fájlban kerülnek elmentésre. A *No*-t választva a projekt megsemmisül, a dialógusablakot bezárva pedig meghiúsul a projekt bezárásának kísérlete.



4.24 ábra: A projekt bezárásakor megjelenő dialógusablak

5 Végeredmény

5.1 Értékelés

Az elkészített programom teljesíti az elé támasztott, a hang objektíven mérhető tulajdonságainak átfogó elemzésével kapcsolatos elvárásokat. A szoftver pontosan végzi a számításokat, logikusan választja el a különböző funkciókat, és hatékonyan kezeli a mentést. A grafikus felületnek a hibák minimalizálására szolgáló tulajdonságai biztonságos és felhasználóbarát működést tesznek lehetővé. Összességében elégedett vagyok a munkámmal.

5.2 Továbbfejlesztési lehetőségek

Az elkészített szoftver sok továbbfejlesztési lehetőséget rejt magában. Jelenlegi változatában a felhasználónak egyesével kell hozzáadnia a hangfelvételeket a projekthez, ami egy nagy hangszer esetén hosszú és fölösleges folyamattá válhat. A hangok nevének automatikus kiosztása mellett meg lehetne valósítani, hogy a felhasználó egyszerre tudjon több felvételt betölteni. Ezzel kapcsolatosan érdemes lehet a meglévő felvételek nevének és elérési útjának szerkeszthetőségét is biztosítani. Mivel egy regiszter esetén hasonló hangszínű sípok elemzése megy végbe, a szakaszszétválasztást követő lépések azonos beállításokkal automatizálhatók. A számításokra vonatkozó beállításokat - főleg a HPS lépései, valamint a centroid-, és a hangosság-számításnál használt harmonikusok számának meghatározása kapcsán - elkérhetné a rendszer a felhasználótól, illetve síptípustól függő ajánlást is adhatna. Jelen formájában a program egy regiszter hangjait kezeli, de egy magasabb hierarchiai szint létrehozásával a sípsorokra vonatkozó információkat egymással is össze lehetne hasonlítani, vizsgálhatóvá téve az egész orgona hangképét. Továbbá a számítási eredmények és a vizsgálat során létrehozott grafikonok exportálása is hasznos funkció lehet.

6 Összegzés

A feladatom az orgonahang elemzésére alkalmas módszerek bemutatása, és egy szoftver fejlesztése volt, amellyel összehasonlíthatók egy regiszter hangjainak objektíven mérhető tulajdonságai a sípokról készült hangfelvételek alapján.

A megoldáshoz először az orgonák történetével, szerkezetével és típusaival kapcsolatos szakirodalmakban merültem el, hogy teljesebb képet kapjak az orgonaépítők munkájának kihívásairól és a sípok hangját befolyásoló tényezőkről. A sípok hangja érzeti jellemzőinek szétválasztásával rögzítettem a feladat megoldása során vizsgálandó tulajdonságokat. Megállapítottam, hogy ezekhez a szubjektív jellemzőkhöz milyen fizikai tulajdonságok társulnak, melyekre vonatkozva elvégezhető és objektív módon kiértékelhető a mérések.

Jelfeldolgozásról szóló szakirodalmak segítségével megismerkedtem a hangfelvétel koherens újrámintavételezéséhez szükséges számítási lépésekkel, és a vizsgált értékeknek az eredő jelből való kinyerésének módjával. Ezen módszerek segítségével elemző alkalmazást készítettem Matlab környezetben.

A szoftver fejlesztése során sokat tanultam a Matlab nyelvről, különösen a jelfeldolgozási, objektumorientált, grafikus felület-fejlesztési és szerializációs tulajdonságairól. Bemutattam az elkészült program működését, kiértékeltem az eredményt és javaslatokat tettem a továbbfejlesztési lehetőségekre is.

Összességében nagyon sokat tanultam az orgonákról, a jelfeldolgozásról és a Matlab-fejlesztésről, miközben létrehoztam egy, a gyakorlatban is jól használható orgonahang-elemző szoftvert.

7 Köszönetnyilvánítás

Elsősorban konzulensemnek, Dr. Rucz Péternek szeretném megköszönni a rengeteg segítséget, amit a dolgozat készítése közben kaptam, és hogy felkarolta a témát. Sokat tanultam az elmúlt pár hónap alatt. Köszönet illeti a családomat is a sok támogatásért főleg a munka első és utolsó szakaszaiban. Továbbá szeretném megköszönni volt zongoratanáromnak, Tóth Marcellnek, hogy az egyetemi tanulmányaim alatt a zenében is fejlődhettem, valamint a munkácsi római katolikus közösségnek a lehetőséget és a lelkes támogatást az orgonáláshoz.

Irodalomjegyzék

- [1] Darvas Gábor, *Évezredek hangszerei*, Zeneműkiadó Vállalat, Budapest, 1961
- [2] Pécsi Sebestyén: *Az orgona*, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1967
- [3] Solymosi Ferenc: *Orgonaismeret*, Apor Vilmos Katolikus Főiskola, Vác, 2006
- [4] Dr. Rucz Péter: *Innovative methods for the sound design of organ pipes*, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2015
- [5] Geda Márton: *Az élhang aeroakusztikai szimulációja*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2013
- [6] Miklós András, Angster Judit: *Properties of the Sound of Flue Organ Pipes*, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2000
- [7] BME MIT Tanszéki Munkaközösség, *Digitális jelfeldolgozás*, 2008 [Online], <https://adoc.pub/digitalis-jelfeldolgozasc1e59ec7ef865fd51abea2233e80b61283565.html>. [Hozzáférés dátuma: 2020. december. 11.]
- [8] Dr. Nagy István: *Műszaki diagnosztika 1. Gyakorlati diagnosztika*, 2013 [Online], https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_muszaki_diagnosztika_1_gyakorlati_diagnosztika/10_5_leckerites_effektus_vagy_letapogatasi_hiba.html. [Hozzáférés dátuma: 2020. december 11.]
- [9] Patricio de la Cuadra: *Robust Methods for Pitch Detection*, [Online], https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/220c/pitch_detection/img2.htm. [Hozzáférés dátuma: 2020. december 11.]
- [10] Fiala Péter, Rucz Péter: *Hangjelek digitális feldolgozása az akusztikai gyakorlatban* [Online], https://last.hit.bme.hu/sites/default/files/documents/fft_leiras_0.pdf. [Hozzáférés dátuma: 2020. december 11.]