

Debreceni Egyetem

Természettudományi és Technológiai Kar

Fizika Intézet

Villamosmérnöki Tanszék

Villamosmérnöki BSc szak

Hangszerhangolás és frekvencia vizsgálat zongorák esetében

Veres Júlia

2024.



**DEBRECENI
EGYETEM**

TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS TECHOLÓGIAI KAR / FIZIKAI INTÉZET

Villamosmérnöki Tanszék

Dr. Battistig Gábor tanszékvezető

H-4026 Debrecen, Bem tér 18/a. H-4002 Debrecen, Pf.: 400

Tel.: 52/509-201, e-mail: fizika@science.unideb.hu

SZAKDOLGOZAT

Veres Júlia

Villamosmérnök BSc szakos hallgató részére

Hangszerhangolás és frekvencia vizsgálat zongorák esetében

A MEGOLDANDÓ RÉSZFELADATOK:

1. Ismertesse a hangszerhangolás és a frekvencia vizsgálatának jelentőségét a zenei gyakorlatban!
2. Mutassa be a hangok és frekvenciák egymáshoz valóviszonyát!
3. Vizsgálja meg és mutassa be a hangszer elhangolódásának okait!
4. Tekintse át a hangszerhangolás különböző módszereit és azok alkalmazhatóságát!
5. Mutassa be a főbb zongora típusok működését, kialakításának fontosabb részleteit, paramétereit
6. Határozza meg a hangszerhangoláshoz szükséges frekvencia tartományokat!
7. Ismertesse más hangszerek hangolási módszereit!
8. Válassza ki a rendszer elemeit, beleértve a mikrokontrollereket és szenzorokat, az objektív adatok alapján!
9. Tervezze meg a hangszerhangoló eszközök hardveres és szoftveres architektúráját!
10. Állítsa össze a prototípus áramköröket és írja meg a programkódot!
11. Tervezze meg a PCB-t és tesztelje a prototípust, beleértve a funkcionális tesztelést és kalibrálást!
12. Értékelje ki a mérési eredményeket!
13. Hasonlítsa össze a megvalósított rendszert a tervezettel, és értékelje az esetleges eltéréseket, majd javasoljon lehetőségeket a rendszer továbbfejlesztésére vagy bővítésére!

BELSŐ KONZULENS:

Kiss Rebeka, kutatási asszisztens

Debrecen, 2024. február 3.

A szakdolgozat kidolgozását támogatom.



Battistig Gábor
Dr. Battistig Gábor Kornél
szakfelelős egyetemi tanár

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
Hangszerhangolás és frekvenciavizsgálat fontossága a zenei gyakorlatban	3
Hangok és frekvenciák viszonya	4
Zongora típusok, működésük, kialakításaik lényeges részei	8
A zongora elődei	8
A modern zongora	11
Az elhangolódás okai	14
Környezeti paraméterek mérése	15
Hangszerhangolás különböző módszerei, eszközei	19
Hangszerhangoláshoz szükséges frekvencia tartományok	21
Komponensek kiválasztása	22
Jelfeldolgozó rendszer	22
Mikrofon	24
A rendszer felépítésének bemutatása	26
Komponensek részletes bemutatása és csatlakozásiak	27
Kalibráció.....	30
A kalibrációs LabVIEW program.....	30
Mérési program.....	34
A LabVIEW program részekre bontva	35
Használati útmutató a felhasználónak.....	40
Gyakorlati megvalósítás	43
Összefoglalás	48
Irodalom jegyzék	51

Bevezetés

A zongora hangolás egy rendkívül precíz folyamat, amely során a hangszer minden egyes billentyűjéhez tartozó hangot a megfelelő frekvenciára kell beállítani. Az akusztikus zongorák összetett felépítésük miatt gyakran elhangolódnak, ezzel rontva a felhasználó és hallgató élményét. A zongorahangolók számára nélkülözhetetlen eszközök a pontos és megbízható frekvenciadetektáló rendszerek, amelyek segítségével a munka nemcsak gyorsabbá, hanem könnyebbé is válik számukra. A célom egy olyan eszköz és program létrehozása, amely képes a frekvenciák azonosítására, majd összevetésére az előre meghatározott és elfogadott frekvencia értékekkel. Ezzel az eszközzel a hangolók és a zene kedvelők munkáját kívánom segíteni, elősegítve a minőségi zenei élmény létrehozásának feltételeit.

A modern zenei életben a hangok és azok pontos frekvenciái meghatározó szerepet játszanak a professzionális és amatőr zenei produkciókban egyaránt. Egy jól beállított zongora nemcsak kellemes hangzású, hanem hozzájárul a zenész technikai fejlődéséhez és az adott előadás minőségéhez is. Az akusztikus zongorák népszerűsége még mindig töretlen a digitális zongorák megjelenésének ellenére is, ez pedig megerősíti a tendenciát, hogy a precíz hangolásra még mai napig folyamatos igény van. Az olyan technológiai eszközök tehát, amelyek képesek ezt a folyamatot támogatni, a mai felgyorsult világban teljesen képesek teret nyerni maguknak.

A szakdolgozat célja ez által egy olyan eszköz megtervezése és megvalósítása, amely képesek ezeket a frekvenciákat mérni és megjeleníteni. A frekvenciák érzékelésén túl célkitűzésem volt továbbá az is, hogy az eszköz képes legyen a mért értékek pontosságát megállapítani, a hangok elfogadott pontos frekvencia értékei alapján. Ezen adatokat pedig egyértelműen megjelenítse a program felhasználója számára, hogy teljes képet kaphasson a hangszer állapotáról. Illetve a későbbi problémák elkerülése érdekében, a hőmérsékletmérést is fontos szempontnak tartom, amely nagyban képes befolyásolni a hangolás maradandóságát. Ezért ezt a paramétert is szeretném kijelezni a program kezelő felületén.

A dolgozat első felében kifejezetten a zongorahangolás alapjaként szolgáló frekvenciák és hangok viszonyának vizsgálatára fektettem hangsúlyt, majd a hozzájuk kapcsolódó felharmonikusok lényegességére. Ezt követően ismertetem a mai zongorák kialakulásának evolúcióját, amelynek nagy szerepe van ma ismert zongora hangok képzésében és az elhangolódás oka mögötti fizikában. Ezután ismertetem a frekvencia és

hőmérséklet mérés alapjait, a hozzá tartozó komponensek kiválasztásával. A központi részben pedig bemutatom a kiválasztott alkatrészeket, majd következik programkód működésének és felépítésének ismertetése. Végősorban pedig a hardver tervezésének fő lépéseit és a kész eszközzel elkészített mérést és annak kiértékelését leírását készítettem el.

Hangszerhangolás és frekvenciavizsgálat fontossága a zenei gyakorlatban

A hangolás azóta létező szakma, amióta megjelentek a bonyolultabb szerkezetű igényesebb hangszerek. A zongora elődeinél rendszeresen szükséges volt kisebb javításokat elvégezni akár egy-egy előadás alatt is, ezért ezekben az időkben még maguk a felhasználók is értettek a beállításukhoz. Ekkor még a nyersanyag technikák nem jártak olyan magas szinten, mint manapság ezért, a húrok is könnyebben szakadtak és akár más kisebb hibák is nagyobb gyakorisággal jelentek meg, a használt eszközöknél. Ezek a technika fejlődésével, a hangszerek kialakításával kezdtek el specifikusabb területekké válni. [1,2]

A hangoló feladatai közé nem csak a húrok feszültségének ellenőrzése, hanem más karbantartási feladatok is társulnak, például az eszköz tisztítása, kalapácsok ellenőrzése, csiszolása, beállítása és további kisebb mechanikai javítások. Szakszerű beállításhoz minden esetben szükség van, amikor a temperált skála hangjai már hamissá válnak (kiesnek az adott tartományból). Ezért nagyon jó hallással kell rendelkezniük a mestereknek, hiszen a hangokat hiába állítanánk be a megfelelő frekvencia tartományra, ezek a szám adatok nem veszik figyelembe a hangszer egyedi kialakítását, a helyiség jellemző tulajdonságait és megrendelő sajátos preferenciáit, így egy nyers hangzást kapunk, amely nem feltétlenül lesz kellemes. Ebben az esetben az előbb említett kritériumokat is beleszámítva a hangoló feladata a hangzás kialakítása a frekvenciák néhány tizedes-százados állításával. [2]

Ilyenkor azonban felmerülhet a kérdés, hogy ha minden eszköznek egyedileg alakítják ki a hangját-hangzását, akkor hogyan lehetséges az, hogy nincs nagyobb eltérés két hangszer esetében. Ezt egy biztos pont megállapításával oldották meg a zenészek, amely az A4 hang a maga 440 Hz-es értékével. Ezen a frekvencián szólal meg a hangvilla is, amelyet az énekesek és a zenekarok használnak hangolás esetében. Itt megjegyzendő, hogy a hangvilla fémből készül, így kisebb torzulások előfordulhatnak a hőmérséklet függvényében. [1,2]

Azonban ahhoz, hogy a finomhangolás megtörténhessen, szükség van (minden esetben) a hangok pontos frekvenciájára való beállítására. Ehhez pedig egy eszközre, amely képes az adott frekvenciákat detektálni.



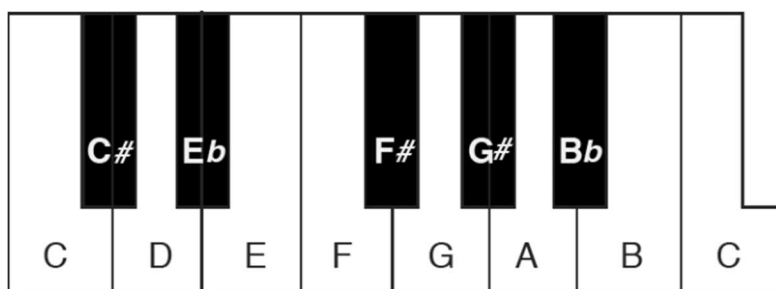
1.ábra. Hangvilla [x]

A hangvilla fontos szerepet játszik a zenei hangolásban, a korai időkben nagyrészt csak, ehhez az eszközhöz tudták viszonyítani az alaphangok hangmagasságát. A legtöbbször használt hangvilla a 440 Hz-es tartományban bocsát ki magából hangot. [1,2]

Hangok és frekvenciák viszonya

A zenei oktatás alapja a C-dúr skála, a legegyszerűbb skála a zeneelméletben, amelyet a zongorán a fehér billentyűk leütésével szólaltathatunk meg.

A skála tagjai: C – D – E – F – G – A – H – C hangok. [1]

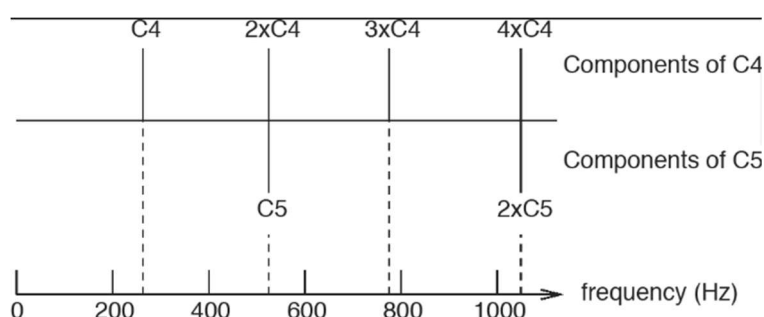


2.ábra. C – dúr megjelenése a zongora billentyűzeten [1]

Ahogy az ábrán is látszik, megjelenik két „azonos” hang, jelen esetben a két C. Két azonos hang közötti hang köztávolságot oktávnak nevezünk. Az azonosnak tűnő hangok között azonban lényegi különbség, hogy alaphangfrekvenciákban és hangmagasságban sem egyeznek meg. Az egyezésük okát a frekvenciák közötti összefüggésben kell keresnünk. A baloldali C₄-es hang (amely a zongora középső C hangja is egyben) frekvenciájában fele akkora nagyságú, mint a tőle egy oktávval magasabban található C₅-ös hang. Tehát ha középső C₄ hang frekvenciája $f_1 = 261,6$ Hz, akkor a C₅ frekvenciája (amit f_2 -vel jelölünk) $f_2 = 2 \cdot f_1 = 523,3$ Hz és ez a sor folytatódik a több oktáv távolságra fekvő hangra is. Így akár a C₅ után a C₆ is meghatározható a következőképpen: Eddig C₄-est vettük a skála aljának

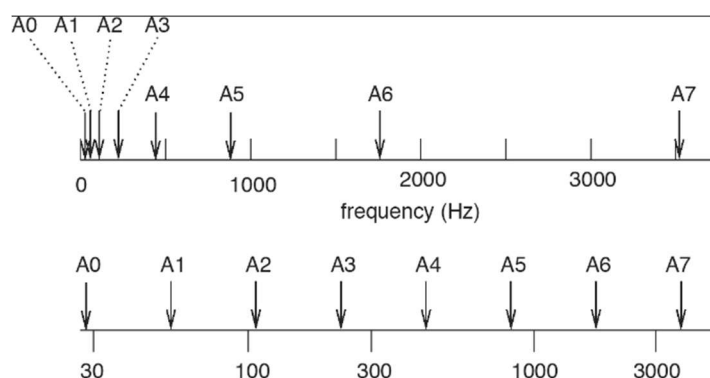
és a C5 volt a magasabban helyezkedő hang tehát ő helyezkedett el a zongorán a jobb oldalon.

Most már azonban meghatároztuk a C5 frekvenciáját ($C5 = 523,3 \text{ Hz}$) és a tőle egy oktávval feljebb található C6-ot keressük. Ezért az ábrán található baloldali C veszi fel a C5-ös értéket, a jobboldali pedig a C6-ot. A jelölés marad, mint $C5 = f_2 = 523,3 \text{ Hz}$, ezért a $C6 = f_3$ -at keressük. Ez pedig az eddig leírtak alapján kétféleképpen jöhet létre, vagy a C5-ös értékét szorozzuk kettővel, vagy C4-hez képest keressük két oktávval feljebb, azaz a C4 értékét szorozzuk négygyel. Az első eset jelenleg egyszerűbb tekintettel arra, hogy a C5 értékét már kiszámoltuk. Így tehát a $C6 = f_2 * 2 = 1046.6 \text{ Hz}$. [1]



3.ábra. C4 és C5 harmonikusainak egyezésének megjelenítése [1]

A hang azonosságok a felharmonikusok egyezésében találhatóak, a C5 alaphangja egybeesik a C4 második harmonikusával, illetve a C5 második felharmonikusa a C6, ami egyezik a C4 negyedik harmonikusával. Ezért, ha két hangot, amelyek oktávnyi távolságra vannak egymástól, egyszerre szólaltatunk meg, ezek miatt az átfedések miatt hallunk hasonlóan vagy azonosnak. [1]

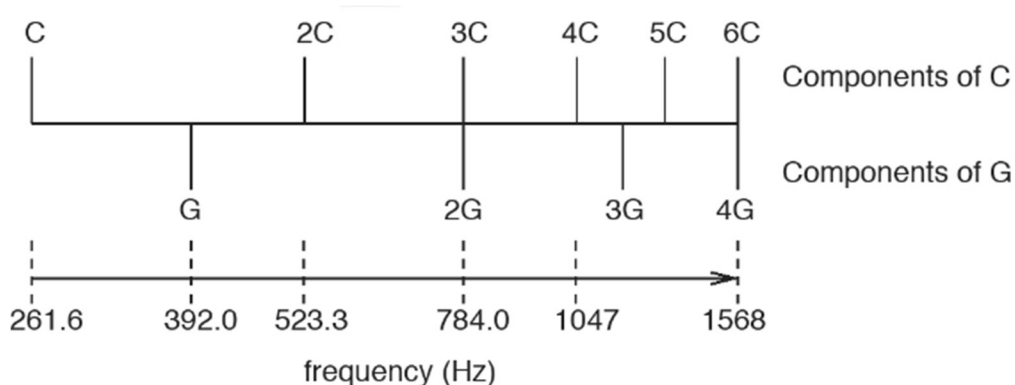


4.ábra. A hang oktáv alapú skálája lineáris és logaritmikus skálán [1]

Az 4. ábrán a hangok elhelyezését figyelhetjük meg. Az ábrán felül, lineáris skálán, az alul pedig logaritmikus skálán. Az, hogy a logaritmikus skálán a hangok egyenletesebben

oszlának el pontosan az előbb elmagyarázott műveletnek az eredménye miszerint az oktávok számításához bármelyik hang esetében kettő valamelyik hatványával kell szoroznunk a frekvencia értékeket, hogy megkapjuk a magasabb hangokat. [1]

Azonban nem csak oktávnyi távolságú hangok adnak kellemes hangzást. További formája a Püthagorasz skála alapját adó kvintek, mint pl.: C és G hangok egyszerre való lejátszása, ahol a hangok között öt hangköznyi hangtávolság található. Ez a megvalósítás éppen úgy leírható matematikailag, mint az előbbi esetben az oktávoknál. Ebben az esetben azonban aránypárokról beszélhetünk, még pedig $2/3$ arányokról az alaphangok esetében.

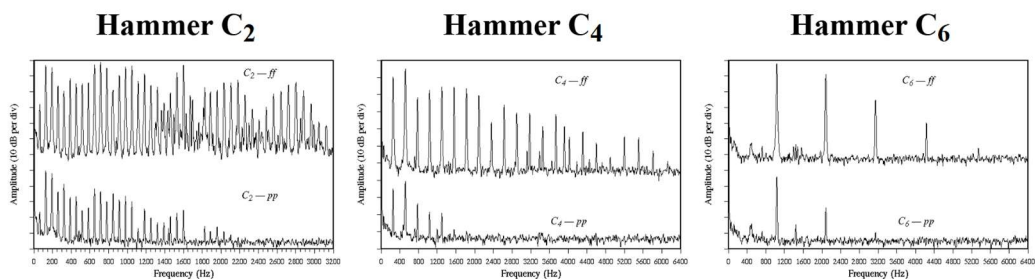


5.ábra. kvintek megjelenése, harmonikusok ábrázolása logaritmus skálán [1]

Ahogy az ábrán is látszik a C hang harmadik felharmonikusa és a G hang második felharmonikusa megközelítőleg azonos frekvenciájú hasonlóan a C6 és G4 is ismétli ezt. Ez arra utal, hogy a hangok között kvint nagyságú hangtávolság található. Azonban kvintnek nem csak a C és G hang kapcsolatát lehet nevezni és fontos megjegyezni, hogy ezek a kvintek sem teljesen fedik egymást, hanem pártizedes közelítéssel lehet őket hasonlóknak tekinteni.[1]

Azonban a hangok harmonikusainak nem csak a zenei hangzás kialakításában van nagyon nagy szerepük, hanem a frekvencia detektálás folyamatát is nagyban tudják befolyásolni. Ennek oka egyszerre található a kalapács mechanikában és a felharmonikusokban. A kalapács és a húrok által kibocsátott frekvencia nagyban függ attól, hogy a kalapács milyen erővel üti a húrt. Amennyiben lágy ütésről van szó, sokkal kevesebb felharmonikus keletkezik, és a húr egy lágy rugóként viselkedik, ezáltal kevesebb felharmonikus képez a rezgésével. Erős kalapács ütésnél, azonban ez a spektrum sokkal jobban megnő, mert a húr rezgésével – amely ebben az esetben keményrugóként viselkedik – rengetek felharmonikus képződik, többszöröse egy hal ütésnek. Ez a többszörös

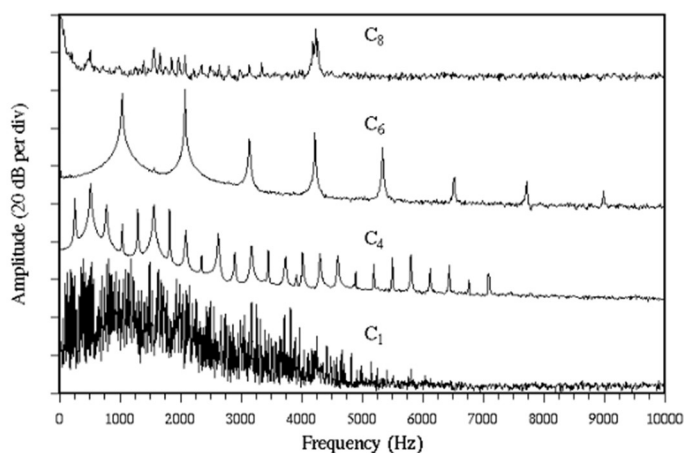
felharmonikus képződés, pedig nehezen szűrhető az alaphangra, amely nehezíti a mérés pontosságát. [29]



6.ábra. A C hang felharmonikusai különböző hangerő esetén [29]

Az 6. ábrán látható csúcsok jelzik a felharmonikusok jelenlétét, optimális esetben a legmagasabb amplitúdóval rendelkező a frekvencia jelzi az alaphangot. Továbbá megfigyelhető, hogy a *ff* (fortissimo), erőteljes játék esetében sokkal több felharmonikus látható mindhárom oktávban. Míg *pp* (pianissimo), nagyon halk játék esetében sokkal szemléletesebben kivehető az alaphang, illetve sokkal kisebbek a felharmonikusok amplitúdói. [29]

Az ábrákon megtekinthető még egy érdekesség a frekvenciákkal kapcsolatban, amely azonban már a hangok hangmagasságával van szoros kapcsolatban. Megfigyelhető, hogy a C hangok oktávonként teljesen eltérnek felharmonikusai számában. A basszus tartományban a spektrum körülbelül 50-60 harmonikust tartalmaz, amelyek 5 kHz tartományig terjednek. A középső tartományban hangonként 20-30-at találhatunk és 7000Hz-ig terjednek. Míg a zongora legmagasabb tartománya már csak önmagát és néhány harmonikust hoz létre. E miatt az összefüggés miatt érezzük sokkal erőteljesebbeknek a basszus tartományú hangokat, szemben a zongora magasabb tartományaival. [29]



7.ábra. a zongora C hangjainak felharmonikusai erős leütés esetében

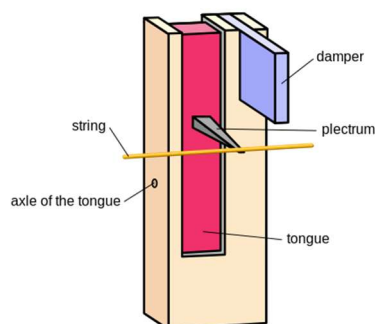
Ez a jelenség azonban nagyban megnehezíti a zongorák basszus tartományának mérését, hiszen a rengetek harmonikus az alaphang elcsendesedését követően képes megzavarni a mérést.[29]

Zongora típusok, működésük, kialakításaik lényeges részei

Két, billentyűs hangszert nevezhetünk meg a zongorák őseinek: a csembalót és klavikordot. Ez a két hangszer továbbá az orgona voltak az elsődleges hangszerek a barokk korban. A csembaló és a klavikord olyan híres zeneszerzőket szolgáltak ki, mint például Johann Sebastian Bach és Georg Friedrich Händel. A zongorát az 1700 évek elején találták fel de csak az 1700-as évek közepétől vált népszerűvé. Zenei korszakban ez a klasszikus korszak eleje, ahol olyan zeneszerzők alkottak, mint például Wolfgang Amadeus Mozart, Joseph Haydn és Ludwig van Beethoven, ők voltak az elsők, akik felismerték a zongorában rejlő potenciált. Mind a háromfajta billentyűsnek megvoltak a maga lehetőségei, de a zongora próbálta ötvözni a csembaló és a klavikord előnyösebb tulajdonságait. Bár az elődök is vibráló húrokkal adtak ki magukból hangot, de a rezgések megvalósulása mindhárom esetben eltérő. Ezzel adva a hangszereknek teljesen más hangzást, zenei hangokat, különböző hangszínekkel, és különböző hang erősségekkel rendelkeztek, ezzel adva teljesen más előadási lehetőségeket a felhasználóknak. [1]

A zongora elődei

I. Csembaló: írásos utalások már az 1300-as évektől utalnak a létezésére, de ténylegesen fent maradt hangszerek az 1500-as évektől fellelhetők. Az 1400-as évektől használták, Franciaországban, Olaszországban, Angliában, Spanyolországban és Németországban is. Ezek az országok mind különböző szerkezeti és zenei megoldásokat használtak, néhány hangszer akár két billentyű-sorral is rendelkezhetett. Itt a megszólaltatás lényege egy háromhúros rendszeren alapult, egy-egy sávhoz három húr tartozott és a billentyűk lenyomásával más-más hangszínt lehetett elérni. Ennek oka, a húrokkal való kontaktust nem kalapácsokkal hanem a billentyűk végén egy apró pengetővel rezegtetik a húrokat. Tehát a három húr nem egyszerre szólal meg, mint a mai zongorák esetében, hanem manuálisan állítható hogy funkciója szerint melyik vagy mennyi húrt mozgasson. [1,2]



8.ábra. Csembaló húrához érő pengető rész [8]

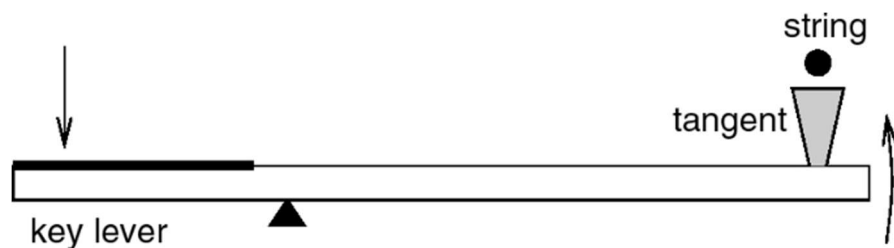
Egy hanghoz, négy fajta megszólaltatási mód tartozik attól függően, hogyan állítjuk be a hangszeret. Az első egy normál hangerőnek nevezhető mód, a második egy halkabb változata ugyan annak a hangnak (ebben az esetben ha két klaviatúrára az eszköz akkora felső sor a halkabb) és ebben az esetben a háromhúr közül az elsőtől eltérőt pengetünk. Harmadik változat egy erősebb hangzást eredményez, itt a három húr mindegyikét pengetjük. A negyedik beállításnál pedig a lantok hangjára hasonló fémesebb enyhén tompított hatást érhetünk el. Ezeket a beállításokat a csembaló belsejében egy kar állításával érhetjük el. [1]



9.ábra. Két manuális csembaló [9]

II. Klavikord: A legnyilvánvalóbb különbséget a többi billentyűshöz képest a klavikord alakja adja. Míg a csembaló némileg hajaz már a mai zongorákra, a klavikord alakja és mérete teljesen eltért tőlük. Ennek okán a húrokat teljesen más hosszúságban és orientációban találhatjuk meg ezekben az esetekben. A húrok a hangszer hosszanti oldalával nagyjából párhuzamosan és párokban futnak (a mélyebb húrok rendszerint közelebb esnek a zenészhez). Az ütőkék, a húrokra merőlegesen fejtenek ki erőt. A húr elrendezése fizikailag

is érdekesség, hiszen minél rövidebb egy húr annál magasabb hangot tudunk vele megszólaltatni azonban egy oktáv távolságnál, már a hurok hosszának kétszerese szükséges (ha mélyebb hangot szeretnénk elérni). Fontos itt megjegyezni, hogy a klavikordok maximum 5 oktáv távolságra voltak tervezve, fizikailag a hurok hosszát ennél a hangtávolságnál már más módszerrel kellett előállítani. Ezért felfedezték, ha egy vezető húr köré egy másik hűrt bizonyos menetszámmal tekernek, akkor azonos hatást érnek el, mint a húr hosszának növelésével. Így tudtak egy viszonylag kompakt eszközt létre hozni, azonban itt a hangok erősségét nem tudták állítani. [1,2]



10.ábra. klavikord húrjához érő ütőke [1]



11.ábra. Klavikord [10]

Eleinte még hátlappal sem rendelkeztek, később azonban az orgonisták nagy megkedvelték a koncepciójukat, ezért építettek nagyobb változatokat akár pedállal ellátva, így tudtak otthon is gyakorolni. [1]

A modern zongora

A hangszerkészítők korán ráébredtek, hogy kalapács mechanikával érdemes a húrokat megszólaltatni, így több országban, több konstrukció jött létre, amelyek elvezettek a zongora jelenleg ismert alakjához. A legtöbb tudós Bartolomeo Cristofori-t fogadja el, mint a modern zongora atyja. Három zongorája fennmaradt és a mai napig megtekinthetők, a legidősebb 1720-ban épült. [1,2]



12.ábra. Bartolomeo Cristofori 1720-ban épült zongorája [11]

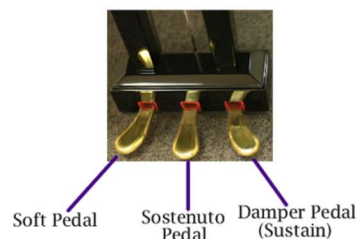
A modern zongorák már magával a billentyűk billentésével is képesek a hangjuk erősségét szabályozni ellentétben elődjeikkel, továbbá kiegészítik még a pedálok egyéb funkciókkal. A mechanikájuk kétféle lehet, bécsi és angol. Bár mindkét fajtának megvannak az előnyei, napjainkban az angol mechanikás vált elterjedtebbé, tömörebb hangzása és strapabírósága miatt. Összességében azonban elmondható, hogy a szerkezetüknek jóval nagyobb erőhatások kell elviselniük, mint elődeiknek. A modern zongorák belsejében fellépő erő egy-egy húr esetében kb. 600 N erősségű, illetve több és vastagabb húrt is tartalmaz. [1]

Instrument	String diameter (mm)	String tension (N)	Number of strings	Total tension (N)
Italian harpsichord (c.1700)	0.30	50	98	4900
Cristofori (c.1720)	0.40	90	108	9700
Stein (c.1780)	0.60	170	122	21,000
Steinway M (modern)	1.0	600	226	140,000

13.ábra.. A húrok és a rájuk ható erők változásának evolúciója [1]

A táblázat alapján meg lehet állapítani, hogy a modern zongoráknak az előző evolúciójú társaikhoz képest is legalább hatszor akkora erőhatást kell elviselniük. Ennek oka kereshető a húrok nagyobb feszültségében, illetve a húrok átmérőjének növekedésében.

Elődeihez képest a jelenkori zongorák testében ezek mellett több húr is található. Ezen változások miatt vált szükségessé a páncéltőkés merevítés a zongorák belsejében, hiszen egy szimpla fa szerkezet nem tudná feszesen és egyben tartani saját szerkezetét ekkor erőhatások mellett. [1] A kalapácsok mozgásának mindkét esetben alapelve, hogy a kalapács „visszaesik” eredeti pozíciójába, így biztosítva egy újabb leütés lehetőségét, hangjának hosszát pedig a pedálok segítségével képes változtatni. A zongorákon három pedál található balról haladva a legszélső a hangfogó pedál, vagy soft pedál, amely a billentyűket eltolja, shifteli, így a kalapácsok három húr helyett csak kettőt képesek megütni. A középső az emelő pedál, vagy "sostenuto" pedál, ennek célja, hogy csak azokat a hangokat nyújtja meg, amelyek a pedál lenyomása közben használatban voltak. A jobbszélső pedál neve billentyűzettoló vagy "sustain" pedál, funkciójában pedig az összes lenyomott hangot kitartja válogatás nélkül, lecsengésig vagy egy újabb pedál lenyomásig. [3]



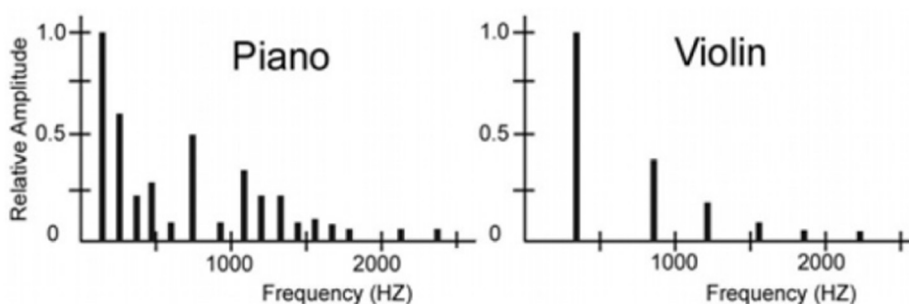
14.ábra. Zongora pedálok elrendezése [12]

Jellegzetes alakját a húrok elrendezésének köszönheti. Azonban fontos megemlíteni, hogy nem csak fekvő zongorák léteznek (angolul: grand piano), hanem léteznek magyar megfelelőben pianínók (angolul: upright piano). A pianínók formája teljesen más, mint a zongorák esetében a helytakarékosság szempontjából. Szerkezetükben azonban csak a húrok pozíciójában térnek el, míg egy zongoránál a húrok horizontálisan futnak addig a pianínók húrjai enyhén megdöntve azonban közelebb a vertikális síkhoz vannak megfeszítve. Ennek eredményeképpen, a kalapácsok mechanikája és a rájuk kifejtendő erő is változik, továbbá egy kicsit másabb tónusú hangzást kapunk. [5,6]



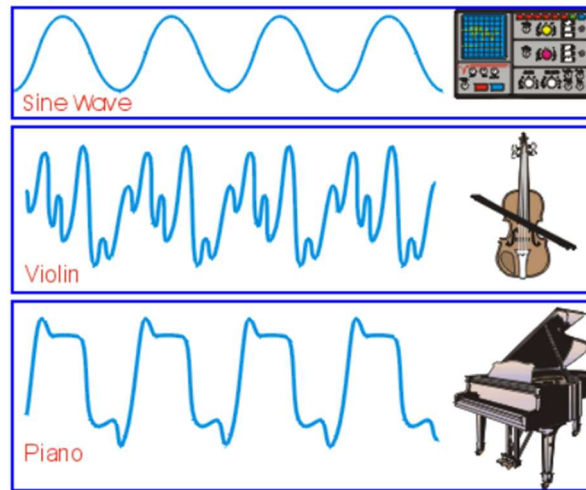
15. ábra. Pianínó szerkezete, kalapácsok elhelyezkedése [13]

Zongora hangjának hullám alakja, más hangszerekhez képest eltérő, ennek oka megint csak a frekvenciák felharmonikusaiban találhatóak. A zongora és a hegedű hangjai és hullámai merőben eltérőek, még ha mindkettő húrok segítségével ad ki magából hangot. Azt már tudhatjuk, hogy a zenei hangok a harmonikusok összetételéből jönnek létre. Bár a zongora és hegedű is hasonló frekvenciákon működik, a különbséget a felharmonikusok összetett keveredése okozza. Mert bár a frekvenciák adják a hangszerek hangmagasságát, addig a felharmonikusok azok, amelyek létrehozzák a különböző hangszerek hangját. [23, 24]



16. ábra. Zongora és hegedű, frekvenciájának összehasonlítása [23]

Az 16. ábrán látható, hogy a két eszköz frekvenciáiban hasonló, de releváns amplitúdóiban eltérő, és ez így szintén megjelenik hanghullámaikban. [23, 24]



17.ábra. Ugyan azon frekvencián a szinusz, a hegedű és zongora hullámai [24]

Az 17.ábrán tehát látható, hogy a különböző esetekben, hogy is változnak meg a kiadott frekvenciák hanghullámai. Ezeknek a hullámoknak teljesen mások akusztikus jellemzők is, hiába szólnak meg azonos frekvencián ezért kapunk minden hangszerfajta esetében egyedi hangzást. [24]

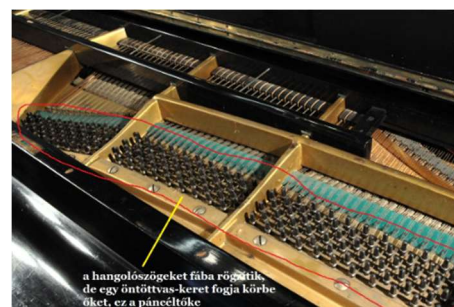
Az elhangolódás okai

A zongora hangjainak eltérése kereshető a szerkezetében (alapszerkezet, húrok és kalapácsok állapotában), illetve hosszabb ideig kitett hőmérsékleti változásoknak.

A szerkezeti struktúra miatti elhangolódás oka lehet a zongorahúrokat tartó szerkezetének fajtája. A két jellemző típus a páncél és fa tőkés zongora, de pontosan a hangolási nehézségek miatt lett elterjedtebb a páncél tőkés zongora. A fa szerkezet könnyen előregedett, megrepedt a több tonnás húzóerők miatt és így a húrokat már nem lehetett olyan feszesre húzni, hogy elérje a megadott frekvencia sávot. Ezért feltalálták, hogy a hangolótűk kapnak, egy plusz páncélmerevítést és bortást így nagyobb szilárdságot elérve. Ennek a szerkezetnek a megnevezése a páncéltőkés zongora. [2]



18.ábra. Fatőkés zongora [4]



19.ábra. Páncéltőkés zongora [4]

A húrok nagyobb százalékban magától a fizikai terheléstől, illetve a környezeti paraméterektől hangolódhatnak el az idők folyamán. A koncert termekben, általában igyekeznek egy folyamatos átlaghőmérsékleteket tartani, amelyhez a hangszer hozzá szokik, így kisebb a szerkezeti degradáció. Illetve a zongorák szerkezete fából van, ezért érzékeny a levegő páratartalmára, párásabb levegő esetén a test és az egyes komponensek, megdagadnak vagy éppen relatíve zsugorodnak a nedvesebb, illetve szárazabb levegő hatására. Ilyen formában tehát az elhangolódásban nagy szerepe van a környezeti paramétereknek, minél szélsőséesebbek, annál hamarabb kell hangolást végezni az eszközökön. [1] Ezek a paramétereket egyes kutatások számszerűsítették, és az ideális hőmérsékletet 65-80 °F-ben azaz 18,3 – 26,6 °C közötti hőmérsékletben állapították. Továbbá megjegyzik, hogy 32°C felett az elváltozás drasztikus, akár napok alatt képes teljesen elhangolódni a hangszer. Ennek oka az acél szálak lineáris hőmérsékleti együtt hatójának nagysága, ez a szám adja, meg hogy az adott anyag a hőmérséklet hatására mennyivel lesz hosszabb 20°C után, Celsius fokonként. Jelen esetben ez a szám 0,012 mm/°C, ami nem tűnhet soknak, de akár tizedekkel is képes elmozdítani a frekvencia nagyságát. Fizikailag mikor a szobahőmérséklet megnő, akkor az acél szálak felveszik ezt a hőmérsékletet és egyre hevesebben kezdenek el vibrálni. A húrok megnyúlnak a feszültségük megváltozik és egyre magasabb frekvenciára változnak. A hőmérséklet csökkenésével pedig ennek a folyamatnak az inverz változata változtatja meg a frekvencia szinteket. A megfelelő páratartalom szintet 45-55% -ban állapították meg. azonban itt is csak ugyan úgy, mint a hőmérsékletnél, adtak egy alsó küszöb értéket ahol már felgyorsul a roncsolódás. Ez az érték pedig a 35% alatti páratartalmat jelenti. Ebben az állapotban a faszerkezet rengeteg párát bocsát ki saját szerkezetéből és ennek okán megint csak változik a húrok feszítettsége. [25]

Ezek miatt a tényezők miatt fontos oda figyelni az állandó páratartalomra és hőmérsékletre, hogy a frekvencia szinteket minél biztosabban meg tudjuk tartani és ne váljon szükségessé a kellenél több hangolást elvégezni. [25]

Környezeti paraméterek mérése

A környezeti paraméterek, amelyek általában befolyásolják hosszútávon az elhangolódás mértékét, a páratartalom és a hőmérséklet. Minden egyes új környezetbe kerülő hangszert hagyni kell pihenni egy pár napig míg, hozzászokik a szoba adott környezeti paramétereire. Tehát egy hangolást értelmetlen lefolytatni azonnal az új helyre kerülést követően, mert az adott helyiség páratartalma lehet kisebb vagy nagyobb a hangszer előző helyéhez képest. Ezért az organikus komponensei ehhez alkalmazkodnak a zongorának,

megduzzadhatnak vagy az előző térfogatukhoz képest összemehetnek. A páratartalom ilyen formában, ha állandó akkor csak kissé befolyásolja a hangszer hangját, azon a kritikusan változó hőmérséklet miatt hangszer a megfelelő hangzás érdekében többször kell hangolni az átlagosnál. [2, 14, 25]

Hőmérsékletet, több fajtát többféleképpen mérhetünk attól függően, hogy mi a célunk. Mérhetjük egy test hőmérsékletét, ebben az esetben nagyban függ a test hőmérséklete attól, hogy milyen anyagokból áll és hogy azoknak milyen a hőmérsékleti együtt hatója. Jelen esetben a test hőmérséklete nagyban függ a szoba hőmérsékletétől, ezért szobahőmérsékletének mérése a fontos. Ehhez több fajta működésű mérőeszközt is használhatunk. Ilyenek lehetnek: az ellenállásalapú hőmérők, a termoelemek, termisztor, félvezető alapú hőérzékelők vagy infravörös érzékelők. [26]

Illetve fontos a páratartalom mérésénél megválasztani pontosan a szenzort, mert különböző mérési elv alapján működnek. Egyes fajták a relatív, míg mások az abszolút páratartalmat mérik. Relatív páratartalomnak azt nevezzük, amikor a levegőben lévő víztartalmat arányosítjuk az azonos hőmérsékleten maximálisan befogadható víztartalommal. [27]

$$RH = \frac{A \text{ levegő aktuális vizgőz tartalma}}{A \text{ levegő maximális vizgőz tartalma}} * 100$$

A végeredményt százalékos formában adjuk meg.

Ehhez képest az abszolút páratartalmi érték nem függ a levegő hőmérsékletétől, csak a levegőben található víz mennyiségétől, amelynek mértékét gramm/köbcentiméterben fejeznek ki.

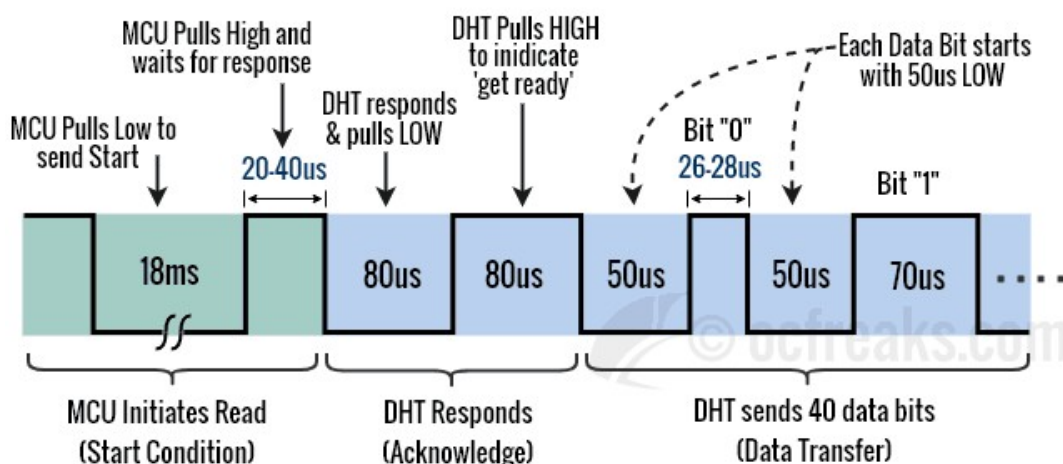
$$AH = \frac{Vízgőz \text{ tartalom (grammban)}}{A \text{ levegő térfogata}} * 100$$

A végeredményt itt is százalékos formában adhatjuk meg. [27]

Számomra, azok a mérőszensorok lennének a legmegfelelőbbek, amelyek a páratartalmat és a hőmérsékletet egyetlen egy szenzoron belül képesek detektálni. Ilyen formában a DHT11 szenzort kezdtem el vizsgálni.

A DHT11 kommunikációjának alapja a mikrovezérlő és szenzor közötti egy vezetékes adattvitel.

DHT11 / DHT22 Protocol



20.ábra. DHT11 és DHT22 kommunikációs ábrája

A DHT11 szenzor kommunikációs folyamata a mikrovezérlő által kezdeményezett adatátvitellel indul, amely során a mikrovezérlő 18 ms ideig alacsony szintre kapcsolja a DATA portot, majd 20-40 µs-ig magas állapotba váltja. Ez a jel kapcsolja ki az alvó (low-power) üzemmódot és ezután ébreszti fel, és kapcsolja be a gyors adatátviteli módot a DHT11-ben (high-speed). Itt a DHT11 80µm alacsony majd újra magasra állítja a kimenetét, ezzel jelezve a mikrovezérlőnek, hogy kész az adatokat továbbítani. A mikrovezérlő elkezd fogadni a bit folyamatot, amit először mindig egy 0-ra húzott állapot előz meg, és az utána következő első 1-es állapotban jelennek a tényleges adatok. 0-bit esetén az adatfolyam 26-28 µs van magasban majd a következő bit előtt egy újabb 50 µs-os szünet következik. Ha pedig a bit értéke 1-es akkor a szünet után, 70 µs-ig van magas állapotban a bitfolyam. [18]

Bár a DHT11 kiválóan képes a hőmérséklet és a páratartalom mérésére, azonban az egy vezetékes kommunikációja miatt képtelen az általam választott adatgyűjtővel együtt dolgozni. A myDAQ adatgyűjtő sajnos nem rendelkezik a megfelelő feldolgozási sebességgel, hogy képes legyen kezelni a DHT11 bit folyamatát, azonban analóg jelek érzékelésére tökéletesen alkalmas így választottam KY-013-as analóg NTC hőmérséklet szenzort.

Az NTC (Negative Temperature Coefficient) hőmérséklet szenzorok működésének alapja a bennük található félvezető anyag ellenállása, amely a hőmérséklet hatására változtatja értékét. Jelen esetben mivel NTC típusról van szó ezért a hőmérséklet növekedésével, csökken az ellenállás. Az ellenállás értékéből pedig ki tudjuk számolni az adott hőmérsékleti értéket. Az NTC szenzor ellenállásának pontos meghatározásához általában egy feszültségosztó áramkört használnak, ahol az NTC-vel sorba kapcsolnak egy

fix értékű ellenállást. A mért feszültség és az ismert ellenállás segítségével kiszámítható az NTC ellenállása. A hőmérséklet és az ellenállás közötti kapcsolatot legpontosabban a Steinhart-Hart egyenlet írja le, amely a következő formában adható meg:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3$$

, ahol T a hőmérséklet Kelvinben, R az ellenállás ohmban, A, B és C pedig az adott NTC-re jellemző konstansok. Ezeket a konstansokat általában kísérleti úton határozzák meg, és segítségükkel az ellenállás értékéből nagy pontossággal kiszámítható a hőmérséklete. [32, 33, 34]

Az általam használt KY-013 modulon az ismert ellenállás értéke 10k Ω , az NTC-re jellemző konstansok, pedig A = 0.001129148, B = 0.001129148, C = 0.0000000876741. [35]

Típus	DHT11	KY-013
Tápellátás	3.3-5.5V DC	3.3-5V
Működési tartomány	Páratartalom 20-90%RH; Hőmérséklet 0~50 °C	- -55°C - +125°C
Pontosság	Páratartalom +-5%RH; Hőmérséklet +-2 °C	- $\pm 1^\circ\text{C}$
Érzékelő egység	Polimer kondenzátor	Hőellenállás (NTC termisztor)
Kimeneti jel típusa	Digitális (egyvezetékes protokoll)	Analóg

21.ábra. DHT11 és KY-013 összehasonlítása[18,19]

Így a hőmérséklet már tudjuk mérni, azonban a myDAQ hátránya, hogy kevés, azaz két analóg porttal rendelkezik, amelyből az egyiket a mikrofon használja a másikat pedig a hőmérő szenzor, így nincs lehetőség a páratartalom mérésére, analóg porton keresztül. Ez azonban nem jelent nagy akadályt, hiszen a hőmérséklet változás nagyobb hatással van húrok hosszára. Ennek oka, hogy a hőmérsékletváltozás közvetlen következménye, a húrok hosszának változása, míg a páratartalom csak közvetett módon okozza ezt a zongora szerkezetének megváltozásával.

Hangszerhangolás különböző módszerei, eszközei

A hangolás módszereinek tárgyalása előtt érdemes beszélni a zenei skálákról. Ezek fontossága az, hogy ezeknek a skáláknak segítségével lehet megtapasztalni, hogy mekkora a frekvencia elváltozás összességében. Ezt pedig nagyon egyszerűen érzékelhetjük, ha egy skálázást (adott hangjegy-együttes tagjainak növekvő vagy csökkenő sorrendben történő lejátszása) egy jól hangolt eszközön hallgatjuk akkor annak kellemes hangzása lesz, míg ha ugyan ezt egy elhangolódott hangszeren halljuk, akkor egy számunkra kellemetlen hangzás jön létre. Azonban nem mindegy, hogy milyen skála alapján állítjuk be hangszer húrjait, míg az egyik fajta hangolás esetében az az adott dallam jól szól, nem jelenti azt, hogy az kellemes lesz egy más skálával beállított hangszeren. [1, 7, 8]

A hangolást a korai időszakokban teljesen más szemlélet alapján végezték, ennek oka a hangszerek hang terjedelmének kisebbsége és a felhasználások korlátozottsága. A korlátozottság olyan értelemben értendő, hogy a korai évszázadokban a hangszerek hangterjedelme jóval kisebb volt, mint a ma ismert zongoráé, felhasználása pedig inkább volt elterjedt a vallási szertartásoknál. Ekkor még inkább használták a tiszta hangolást, melynek lényege, hogy a hangok közötti távolságok egyenlők, például az $A4 = 440$ Hz a tőle oktávnyi távolágra lévő $A5$ pedig 880 Hz. Ennek hangolásnak a következtében az egyes hangnemek (amelyekre kifejezetten hangoltak) kristálytisztán szóltak a többi hangnem viszont érces hangon szólt. Ez már manapság a zenei életben teljesen elképzelhetetlen lenne. A korai hanglás alapja a püthagoraszi skála, itt a 12 hang egymás utáni tisztaságára figyelnek. Ezzel szemben az kiegyenlített hangolás inkább a többszínűségre épít, ezért egyes tartományokat csökkentve teszi lehetővé a több skálán való kellemes játékot. Ez a manapság használt hangolás módszere, ahol a 12 hangú kromatikus skála hangjait egymáshoz képest egyenlő távolságra tolják így alkotva meg a ma is ismert hangzást.[14]

Hangoláshoz többféle eszközt is használnak, de a legjelentősebbek, amelyeket senki sem tud megkerülni az a hangolótűkhöz használandó hangoló kulcs, és egy hangforrás melynek frekvenciája 440 Hz. A húrok két pont között fekszenek melyek közül az egyik fix a másik pedig egy hangoló pint, amelyet egy csavarozási mozdulattal (a húrok ebbe a hangoló szögbe – pinbe vannak befűzve és tekerednek rá) lehet szabályozni. Ezt az állítható tűt nevezzük hangoló szögeknek. A legtöbb hang három húr egyszerre történő megszólalása alapján jön létre. Ennek okán a húrokat el kell szeparálni, ehhez pedig némító szalagot vagy némító tűt használnak. Tehát ezen eszköz segítségével tudjuk megvalósítani a hangolást, a háromból két húrt lefogunk és egyszerre csak egynek a frekvenciájával kell foglalkoznunk

és azt beállítanunk. Később miután azt beállítottuk, egyesével a másik két húrt is beállítjuk, majd ezzel a módszerrel a basszus tartományon kívül az összes hangot képesek lehetünk beállítani. [1,14]

Továbbá szükségünk lehet egy digitális mérő eszközre, amely segítségével a frekvencia tartományokat vizsgálhatjuk. Azonban még egy ilyen eszköz birtokában is szükség van a zenei hallásra, hogy a nem régiben említett csúsztatások (a hangok között) kevésbé érzékelhetők legyenek. [1, 14]

A hangolónak továbbá a szüksége van legalább egy hangvillára melynek frekvenciája az alaphang, mások pedig használnak az általam is tervezni kívánt ETD-t (Electronic Tuning Devices). Feltalálásukat az 1930-as évekre tehetjük, kezdetben ezek nem voltak elterjedt eszközök az áruk és a nagyságuk miatt, továbbá nem vették figyelembe az inharmonicitásokat, azaz a felharmonikusok finomhangolását. Ezért bár segítői voltak a hangolóknak, de nem tudták őket teljesen kiszolgálni, ezért használtuk feleslegessé vált.



22.ábra. 1950-es ETD [37]



23.ábra. Modern ETD [36]

Azonban a technika fejlődésével ez megváltozott, és 1970-től már találhatunk olyan eszközöket, amelyek ezeket az inharmonicitásokat is figyelik. Így most már előszeretettel használják főleg kisebb húros hangszerek esetében pl.: gitár, hegedű, cselló. A legmodernebb ETD-k, azonban már képesek a zongorák nagy hangtartományának megfigyelésére és több minta vétel után számítják és mutatják a megfelelő határokat a felhasználójának. Elterjedésük oka továbbá az is, hogy legtöbb esetben nem feltétlenül egy teljes eszközről beszélünk, hanem egy szoftverről, amelyet a hangoló akár a telefonján, táblagépen vagy a számítógépén is magával tud vinni. Ez azonban még mindig nem teljesen tudja helyettesíteni az emberi szubjektivitást, és a hangzás finom beállítását. Azonban lényegességük abban található, hogy egy-egy ilyen eszköz szakavatott kezekben rengeteg időt megspórol, és kevesebb utóhangolási munkától menti meg felhasználóját. [15, 28]

Hangszerhangoláshoz szükséges frekvencia tartományok

A zongora 88 billentyűjének hangjára, a frekvenciákat az alábbi képlettel tudjuk kiszámolni:

$$f(n) = 440 * (\sqrt[12]{2})^{n-49}$$

, ahol n a billentyű zongorán elfoglalt helye, a 440 az alaphang frekvenciája, a 49 pedig az alaphang zongorán elfoglalt helye. Így egyesével ki lehet számolni a hangok frekvenciáját.

Key number	Scientific name	Frequency (Hz)	Key number	Scientific name	Frequency (Hz)
1	A0	27.5	45	F4	349.228
2	A#0/Bb0	29.1352	46	F#4/Gb4	369.994
3	B0	30.8677	47	G4	391.995
4	C1	32.7032	48	G#4/Ab4	415.305
5	C#1/Db1	34.6478	49	A4	440
6	D1	36.7081	50	A#4/Bb4	466.164
7	D#1/Eb1	38.8909	51	B4	493.883
8	E1	41.2034	52	C5	523.251
9	F1	43.6535	53	C#5/Db5	554.365
10	F#1/Gb1	46.2493	54	D5	587.33
11	G1	48.9994	55	D#5/Eb5	622.254
12	G#1/Ab1	51.9131	56	E5	659.255
13	A1	55	57	F5	698.456
14	A#1/Bb1	58.2705	58	F#5/Gb5	739.989
15	B1	61.7354	59	G5	783.991
16	C2	65.4064	60	G#5/Ab5	830.609
17	C#2/Db2	69.2957	61	A5	880
18	D2	73.4162	62	A#5/Bb5	932.328
19	D#2/Eb2	77.7817	63	B5	987.767
20	E2	82.4069	64	C6	1046.5
21	F2	87.3071	65	C#6/Db6	1108.73
22	F#2/Gb2	92.4986	66	D6	1174.66
23	G2	97.9989	67	D#6/Eb6	1244.51
24	G#2/Ab2	103.826	68	E6	1318.51
25	A2	110	69	F6	1396.91
26	A#2/Bb2	116.541	70	F#6/Gb6	1479.98
27	B2	123.471	71	G6	1567.98
28	C3	130.813	72	G#6/Ab6	1661.22
29	C#3/Db3	138.591	73	A6	1760
30	D3	146.832	74	A#6/Bb6	1864.66
31	D#3/Eb3	155.563	75	B6	1975.53
32	E3	164.814	76	C7	2093
33	F3	174.614	77	C#7/Db7	2217.46
34	F#3/Gb3	184.997	78	D7	2349.32
35	G3	195.998	79	D#7/Eb7	2489.02
36	G#3/Ab3	207.652	80	E7	2637.02
37	A3	220	81	F7	2793.83
38	A#3/Bb3	233.082	82	F#7/Gb7	2959.96
39	B3	246.942	83	G7	3135.96
40	C4	261.626	84	G#7/Ab7	3322.44
41	C#4/Db4	277.183	85	A7	3520
42	D4	293.665	86	A#7/Bb7	3729.31
43	D#4/Eb4	311.127	87	B7	3951.07
44	E4	329.628	88	C8	4186.01

24.ábra. zongorabillentyűk frekvenciatartománya

Komponensek kiválasztása

Jelfeldolgozó rendszer

Tulajdonságok	ESP32	ESP8266	MyDAQ
Gyártó	Espressif Systems	Espressif Systems	National Instruments (NI)
Processzor	Kétmagos Xtensa LX6, 160-240 MHz	Egymagos Tensilica L106, 80 MHz	NI adatgyűjtő vezérlő (DAQ)
RAM	520 KB SRAM	160 KB SRAM	Nincs specifikus memória, PC vezérelt
Wi-Fi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n	Nincs beépített Wi-Fi
Bluetooth	BLE 4.2 és Classic Bluetooth	Nincs	Nincs
GPIO-pinek száma	Akár 34	17	2 analóg I/O, 8 digitális I/O
Analóg bemenetek	18 (12-bit ADC)	1 (10-bit ADC)	2 (16-bit ADC)
Analóg kimenet	2 (8-bit DAC)	Nincs	8 (16-bit DAC)
Energiafogyasztás	Alacsony energiafogyasztású üzemmódok	Mérsékelt alacsony	PC-hez csatlakozik, asztali eszköz
Programozási nyelv	C/C++, Micropython, Arduino IDE	C/C++, Micropython, Arduino IDE	LabVIEW
Interfészek	SPI, I2C, UART, PWM, ADC, DAC	SPI, I2C, UART, PWM, ADC	USB, PC-alapú adatgyűjtés
Használat típusa	IoT, beágyazott rendszerek, szenzorok	IoT, kis energiafelhasználású eszközök	Oktatási és kutatási célú adatgyűjtés
Ár	Kb. 5-10 USD	Kb. 2-4 USD	Több száz USD
Fő előnyök	Többfunkciós, nagyobb teljesítmény, BT+Wi-Fi	Kis energiafelhasználás, olcsó	Precíziós mérés, könnyű integráció a LabVIEW-val
Fő hátrányok	Komplexebb szoftver, magasabb ár	Korlátozott teljesítmény és funkciók	Magas ár, korlátozott mobilitás

25.ábra. ESP8266, ESP32, myDAQ paramétereinek összehasonlítása [16,17,30]

A felsorolt eszközök közül az egyetemi tanulmányaim során sikeresen megismerkedhettem a myDAQ-kal és előnyeivel. Jelen esetben a legnagyobb előnye, hogy kevesebb zajjal képes a mikrofon által fogadott jelek feldolgozni, így sokkal jobb a frekvenciák detektálására. [30] A myDAQ rendelkezik analóg I/O portokkal és digitális I/O portokkal is. Érdekes viszont megemlíteni, hogy az analóg bemeneti portok száma igen korlátozott, hiszen csak kettő darab ilyen csatornával rendelkezik. Míg digitális oldalon sokkal több bementi lehetőséget kapunk, szám szerint 8 darab digitális csatornával rendelkezik. Analóg oldalon kétfajta választható csatornát támogatnak, az egyik a két differenciális bemenet, ahol az értékeket két pont között figyeli meg, vagy a másik bemeneti lehetőség a sztereó audió bemenet, ezek teszik lehetővé az audió és analóg jelek pontos mérését. Továbbá rendelkezik egy 16 bites ADC (Analog Digital Converter) átalakítóval, amely segítségével képes nagy felbontást és pontosságot biztosítani. A maximum mintavételezési sebessége 200 kS/s (kilosamples per second), azaz 200 000 mintát vesz másodpercenként, ami alkalmassá teszi különféle dinamikus jelek valós idejű megfigyeléséhez. A Nyquist-Shannon mintavételi tétel alapján a legnagyobb mérhető frekvencia a mintavételezési frekvencia fele. Tehát egy 200 kS/s mintavételezési sebességű ADC esetén: Legnagyobb mérhető frekvencia = $(200 \text{ kS/s}) / 2 = 100 \text{ kHz}$. [30]

Az ADC működésének első lépés a mintavételezés, ahol az analóg jelet diszkrét időpontokban mintavételezzük. A mintavételezési frekvenciát a Shannon-Nyquist mintavételi törvény alapján határozzuk meg, amely kimondja, hogy a mintavételi frekvenciának legalább kétszer akkorának kell lennie, mint a jel legnagyobb frekvenciakomponense. Minél nagyobb a mintavételezési frekvencia, annál pontosabban tudjuk rekonstruálni az eredeti jelet, de ez növeli a feldolgozandó adatmennyiséget is. Következő lépés a tartás, a mintavételezést követően egy mintavevő-tartó áramkör (sample-and-hold circuit) rögzíti a jel pillanatnyi értékét. Ez biztosítja, hogy az érték stabil maradjon az átalakítás ideje alatt. Majd a kvantálás lépésben az analóg jel amplitúdóját diszkrét értékekre kerekítjük. Az ADC felbontása határozza meg, hány különböző szintre tudjuk kvantálni a jelet. Például egy 8 bites ADC 256 (2^8) különböző szintet tud megkülönböztetni. Az utolsó lépésben a kvantált értékeket bináris kóddá alakítjuk. Ez a digitális kimenet, amit a további digitális feldolgozó egységek használni tudnak. Az ADC pontosságát és sebességét több tényező befolyásolja, többek között a mintavételezési frekvencia, a felbontás (bitek száma), és a konverziós idő. A nagyobb pontosság általában

hosszabb konverziós időt és magasabb költséget jelent, így mindig az adott alkalmazás követelményeinek megfelelően kell megválasztani az ADC paramétereit. [31]

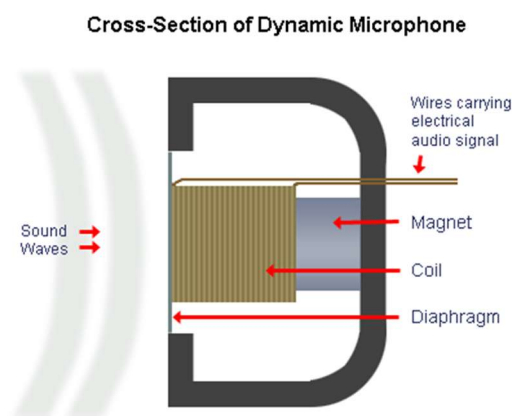
A myDAQ rendelkezik továbbá DAC átalakítóval is, melynek felbontása szintén 16 bit, és 200 kS/s az adatfrissítési sebességű, így a kimeneti jel átalakítását is elég pontosan tudja létrehozni. [30]

DAC átalakító működésének kezdete a digitális jel dekódolásával kezdődik, amely egy megadott bit számból álló adatsort párosít a DAC skálájához, hogy ezeket az általában bináris számokat vissza tudja alakítani analóg értékekké. Ezt követi a kvantált szintekhez való párosítás, ahol az értékeket ténylegesen egy adott feszültség vagy áramértékhez párosítjuk. Attól függően, hogy hány bites az átalakító, ezeket az átalakításokat annál pontosabban vagyunk képesek elvégezni. Utolsó lépésként pedig létrehozzuk az analóg jelet. Ehhez egy alul áteresztő szűrőt szoktak használni, hogy eltávolítsák a diszkrétjel lépcsős fokozatait. [31]

Mikrofon

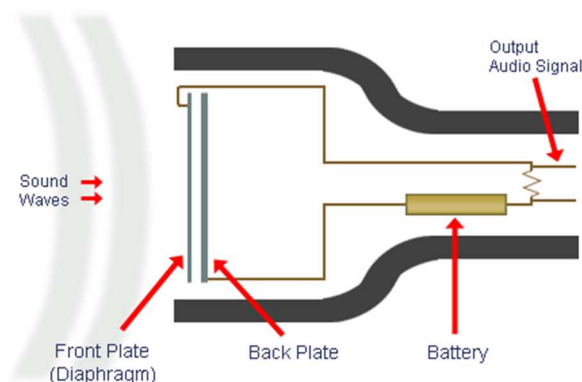
A hangolás második komponense a mikrofon, amelynek képesnek kell lennie elég adatot felvennie a környezetből majd ezeket továbbítani az adatfeldolgozó felé, hogy ezeket frekvenciává tudjuk alakítani. A mikrofonok működésük szerint két fő csoportba oszthatjuk: kondenzátor mikrofonok, illetve dinamikus mikrofonok.

A dinamikus mikrofonok működésének alapja a mágneses indukció. A mikrofon bemeneti részén egy membrán helyezkedik el, amelynek a másik oldalán egy mágnest és azon egy tekercset találunk. A membrán a hangok által keltett hanghullámok alapján meghajlik és mozgásra kényszeríti a tekercset, amely így a mágnesen áramot indukál, majd ezeket az értékeket egy feldolgozó rendszerrel feldolgozza. [21]



26.ábra. Dinamikus mikrofon keresztmetszete[21]

A kondenzátor mikrofonok működése, a nevükből adódóan is kondenzátorok működésén alapul. A mikrofon belsejében két membrán van, az egyik, amely a hangforráshoz közelebb esik, könnyebb anyagból készül, hogy az elnyelt hanghullámoknak megfelelően a távolságát változtatni tudja. A két membrán (fegyverzet) közötti távolság alapján pedig változik a kapacitás. A kondenzátor mikrofon ezt a jelet küldi tovább a feldolgozó egységnek. Azonban ahhoz, hogy ez a jelenség létre jöjjön, egy külső egységnek a fegyverzeten biztosítania kell a folyamatos feszültséget egy tápellátással.[22]



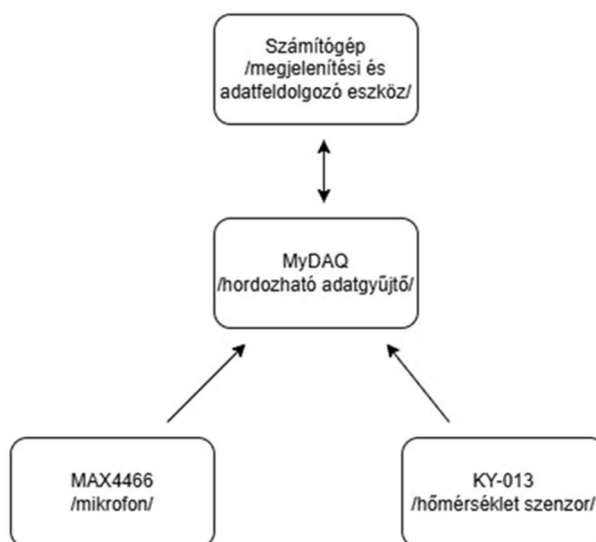
27.ábra. kondenzátor mikrofon keresztmetszete[22]

	KY-038	MAX4466	INMP441
Mikrofon típusa	Elektret kondenzátor mikrofon	Elektret kondenzátor mikrofon	MEMS mikrofon
Erősítő típusa	LM393 komparátor	Műveleti erősítő (állítható erősítés)	Integrált I2S interfész
Érzékenység	Közepes	Állítható (potenciométerrel)	-26 dBFS (alapértelmezett)
Frekvencia tartomány	100 Hz – 10 kHz	20 Hz – 20 kHz	60 Hz – 15 kHz
Kimenet	Digitális és analóg	Analóg	Digitális (I2S)
Tápellátás	3.3V – 5V	2.4V – 5.5V	1.8V – 3.6V
Üzemi áram	~0.5 mA	~0.5 mA	1.4 mA (typical)
SNR (jel-zaj arány)	Közepes (~60 dB)	~62 dB	61 dB
Interface	Analóg/Digitál	Analóg	I2S (Digitális Audio)
Felhasználás	Alapszintű hangérzékelés (pl. taps)	Általános célú analóg mikrofon	Kiváló minőségű audio alkalmazások, hangfelismerés

28.ábra, Mikrofonok összehasonlítása [38, 39, 40]

A három mikrofon közül a választásom a MAX4466-ra esett, mert az érzékenységét tekintve ez a legerősebb a három mikrofon közül, a 20 Hz -20 kHz-es frekvencia tartományával.

A rendszer felépítésének bemutatása



29.ábra. A rendszer blokkdiagramja

Az adatok szoftveres feldolgozásához és megjelenítéséhez a számítógépet és a LabVIEW programot használtam. A rendszer működéséhez szükséges adatok rögzítésére és feldolgozására az NI myDAQ hordozható adatgyűjtőjét alkalmaztam. A LabVIEW és myDAQ segítségével lehetőségem volt valós időben adatokat gyűjteni és feldolgozni. A rendszer így nem igényel különösebb feszültség forrást, mint ami a számítógéphez szükséges, hiszen az adatgyűjtő közvetlen csatlakozásának a köszönhetően a számítógép USB portját használja. A LabVIEW felületen grafikus programozással megírtam a programot, amit könnyen lehet használni. Ezek után pedig csak csatlakoztatni kell a mérésekhez szükséges szenzorokat, amelyek jelen esetben: frekvencia méréshez a MAX4466 elektret kondenzátor mikrofon, a hőmérséklet változásainak vizsgálatára pedig a KY-013 analóg hőmérséklet szenzor.

Komponensek részletes bemutatása és csatlakozásiak

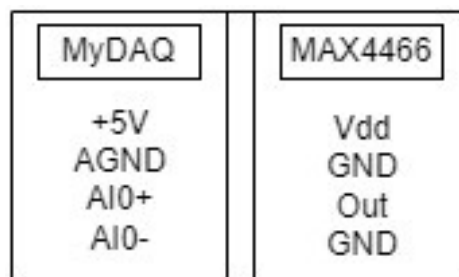
Mint már említettem a myDAQ egy hordozható adatgyűjtő eszköz, amelyet a National Instruments fejlesztett ki. Bemeneteit tekintve, rendelkezik kettő analóg bemenettel és 2 analóg kimenettel, illetve digitális be és kimenetekkel is, így sokféle mérés elvégzésére jó választás. Számomra a kifejezett szempont, ami miatt ezt az eszközt választottam az az analóg csatorna sávszélessége. Az analóg csatornájának bemenete 100 kHz-es sávszélességgel rendelkezik, ami jelentősen meghaladja az általános ESP (például ESP32 vagy ESP8266) eszközök analóg-digitális átalakítóinak (ADC) képességeit (tipikusan 10-80 kHz körüli sávszélesség). Ez a nagyobb sávszélesség lehetővé teszi a myDAQ számára, hogy sokkal nagyobb mintavételezési sebességet érjen el. A sávszélesség azt jelzi, hogy az eszköz milyen frekvenciatartományban képes pontosan feldolgozni a bemeneti jeleket. Ezzel jobb és pontosabb frekvencia detektálást lehet végezni. A második szempont, ami miatt ezt az eszközt választottam az a programozási nyelve. Mivel a myDAQ National Instruments gyártmány, így kompatibilis az egyetemi tanulmányaink alatt megismert LabVIEW programmal. A LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) egy grafikus programozási nyelv, amelyet főként mérési és adatgyűjtési rendszerekhez fejlesztettek ki. Itt a programozás menete nem a hagyományos szöveges alapokon nyugszik, hanem huzalozással és grafikus blokkok használatával érhetjük el ugyan azt az eredményt. Így ennek segítségével a programozás után már szinte egyből egy felhasználó felületet is kapunk, amelyhez nem szükséges különösebb kiegészítő eszköz csak a programozásra is használt számítógép. [30]



30.ábra. NI myDAQ

Mikrofon: A MAX4466 egy integrált mikrofonerősítő modul, amelyet hatékony audiójel-feldolgozásra terveztek. A modul beépített erősítővel rendelkezik, amely lehetővé teszi, hogy folyamatos analóg jelet továbbítson a jel feldolgozó egységhez. Ez a tulajdonsága jelentős előnyt biztosít számára a digitális mikrofonokkal, például az INMP441-gyel szemben, amely digitális jeleket bocsájt ki és kevésbé rugalmas a tápellátás tekintetében.

A KY-038 szintén analóg kimenetet biztosít és rendelkezik erősítéssel, érzékenysége azonban lényegesen alacsonyabb a MAX4466-hoz képest a hangfrekvenciákra vonatkozóan. Ezáltal ez a modul csak az amplitúdó, azaz a hangerősség változására reagál, így csak jóval egyszerűbb feladatokra alkalmazható, mint például a tapsérzékelés. A MAX4466 modul integrált erősítője nagyobb érzékenységet és szélesebb frekvenciaválaszt ad, ami különösen hasznos az akusztikai analíziseknél. Ez a tulajdonsága ideálissá teszi olyan rendszerek számára, ahol a pontos frekvenciafeldolgozás kulcsfontosságú például, hangfelismerés és környezeti zajfigyelés. Emellett az analóg adatgyűjtő rendszerekhez is egyszerűbben csatlakoztatható, mivel nincs szükség digitális-analóg konverziós áramkörre. Ez megnöveli az egyszerűséget és a pontosságot is a rendszerben.

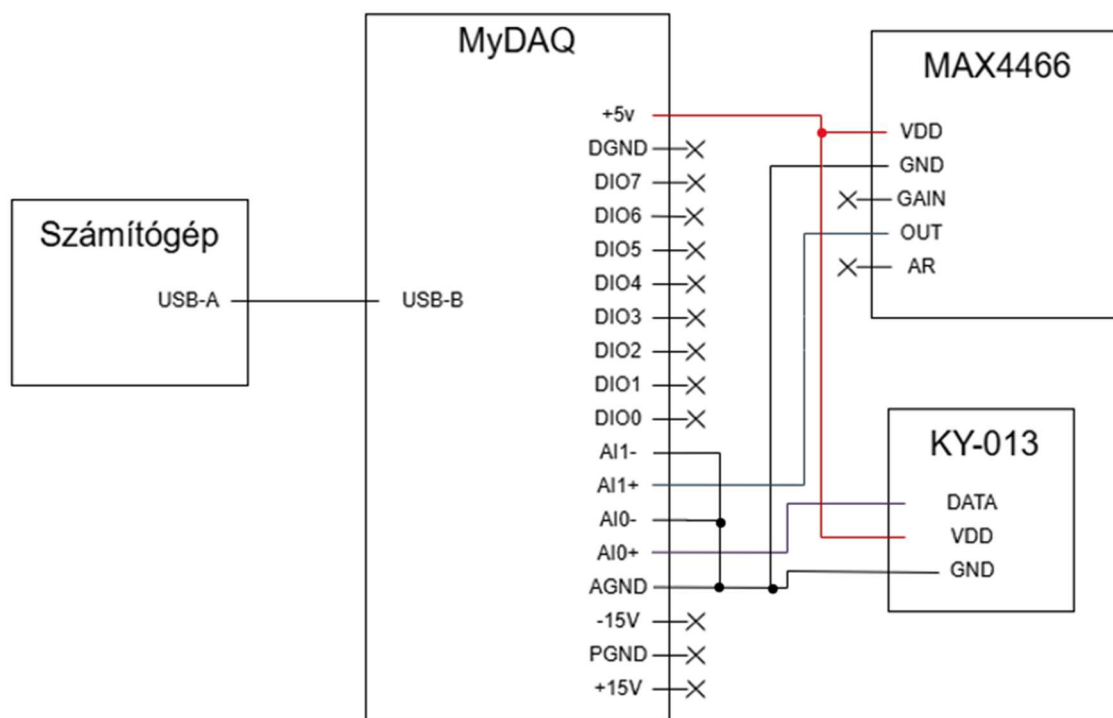


31.ábra. myDAQ és MAX4466 csatlakozásai

Az 30.ábra a mikrofon és az adatgyűjtő csatlakozását írja le. A mikrofon az adatait az Out azaz a kimenetén keresztül küldi a myDAQ számára. Itt azonban érdemes megjegyezni, hogy mivel analóg szenzorról van szó ezért az általa érzékelt paramétereket a két analóg bemenet közötti értékkülönbségből állapítja meg. Ezért az analóg bemenet mínusszal jelzett porját földre kötöttem, míg az analóg bemenet plusszal jelzett csatornája kapja a szenzor kimeneti jelét. Természetes a szenzornak továbbá szüksége van egy 5V-os tápellátásra, amelyet a myDAQ 5V-os portja biztosítja.

Hőmérséklet és páratartalom szenzor: Hőmérséklet szenzorok közül a KY-013-at választottam. A legfontosabb paramétert a myDAQ-al való kommunikáció megvalósítása jelentette. Ezért esett a választásom erre az analóg hőmérséklet szenzorra, tekintettel arra, hogy a myDAQ nem képes egy vezetékes kommunikáció megvalósítására. Továbbá ez a szenzor volt ár-érték arányban a legjobb, hiszen a fontosabb jelen esetben a hőmérséklet mérése a páratartalomnál, amelyek csak akkor befolyásolók, ha drasztikus értékek között változnak, ezt az adatot pedig a KY-013 is könnyen tudja biztosítani a hőmérsékletek mérések során.

A kommunikáció típusa a mikrofon és hőmérséklet szenzor, illetve a myDAQ között analógjel átvitel. Ennek lényege, hogy a mikrofon és hőmérséklet szenzor a környezetéből érzékelt változásokat folyamatosan, (jelen esetben feszültség jeleket adva ki) továbbítja. A programmal ezeket a feszültség értékeket alakítjuk frekvencia értékekké. Így itt nem beszélhetünk kifejezett kommunikációs formáról, mint a digitális jelek esetében, csak folytonos analóg jel átvitelről.



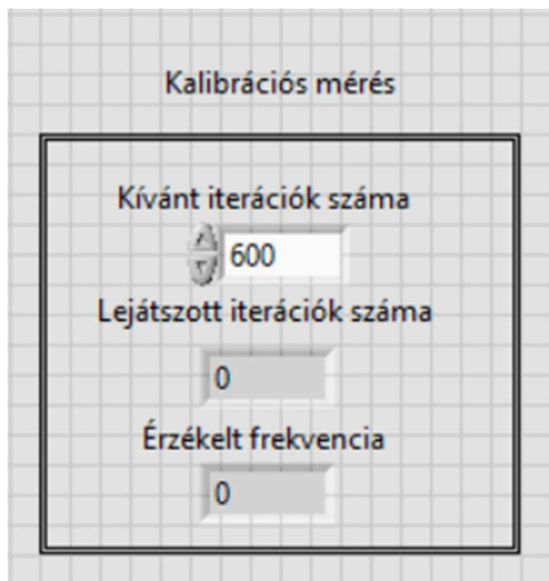
32.ábra. Blokvázlat

Kalibráció

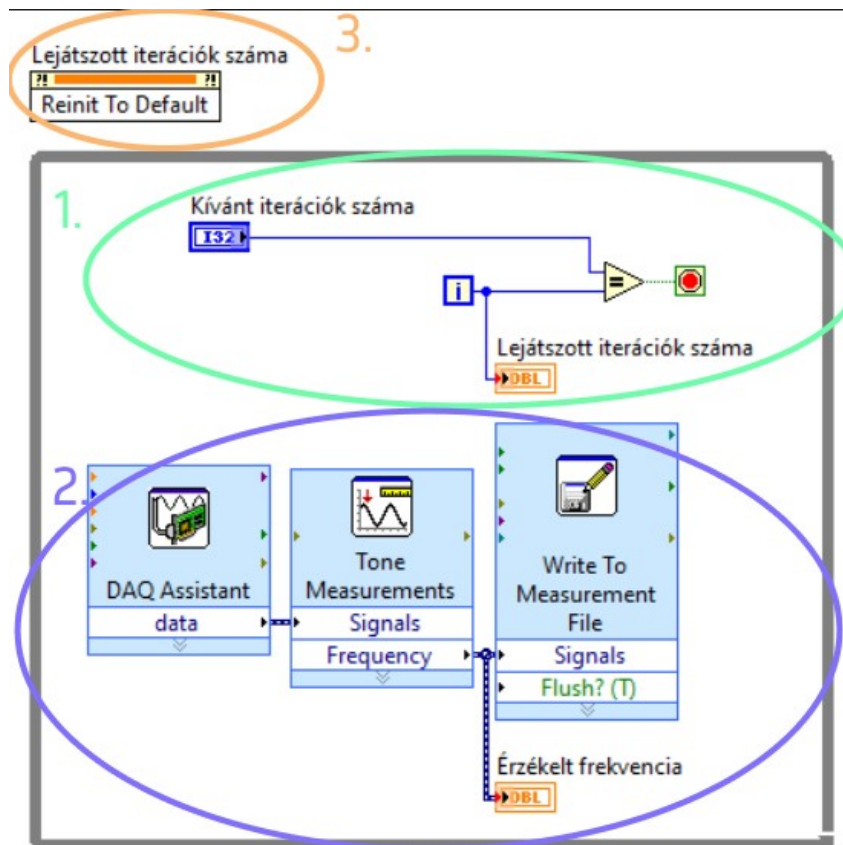
A projekt szempontjából szükséges legalább egy kalibrációs mérés elvégzése, amelynek eredménye befolyásolja a fő mérés paramétereit is. A kalibrációs folyamat lényege, hogy az alaphangot, azaz a 440 Hz-nek megfelelő frekvenciát játszunk a mérési összeállításnak, amely a mérési adatokat egy Excel táblába rögzíti, ahonnan ki lehet számolni a mérésre vonatkozó szórást. Mint említettem ez fontos paramétere a fő mérésnek, még pedig azért, mert ezt a számot később a programban, mint határérték vesszük figyelembe.

A kalibrációs LabVIEW program

A Front panelen be lehet állítani, hogy hány iterációt futtasson a program, amint a beállított iteráció száma megegyezik a lefutottakkal a program automatikusan leáll. Ezzel szabályozni lehet, hogy hány mérési adatból szeretnénk elvégezni a méréshez szükséges szórási számítást. Továbbá megjelenítettem, az érzékelt frekvenciát is, így a kalibráció korai fázisában is lehet következtetni, hogy milyen szórásra lehet számítani a számítások elvégzése után.

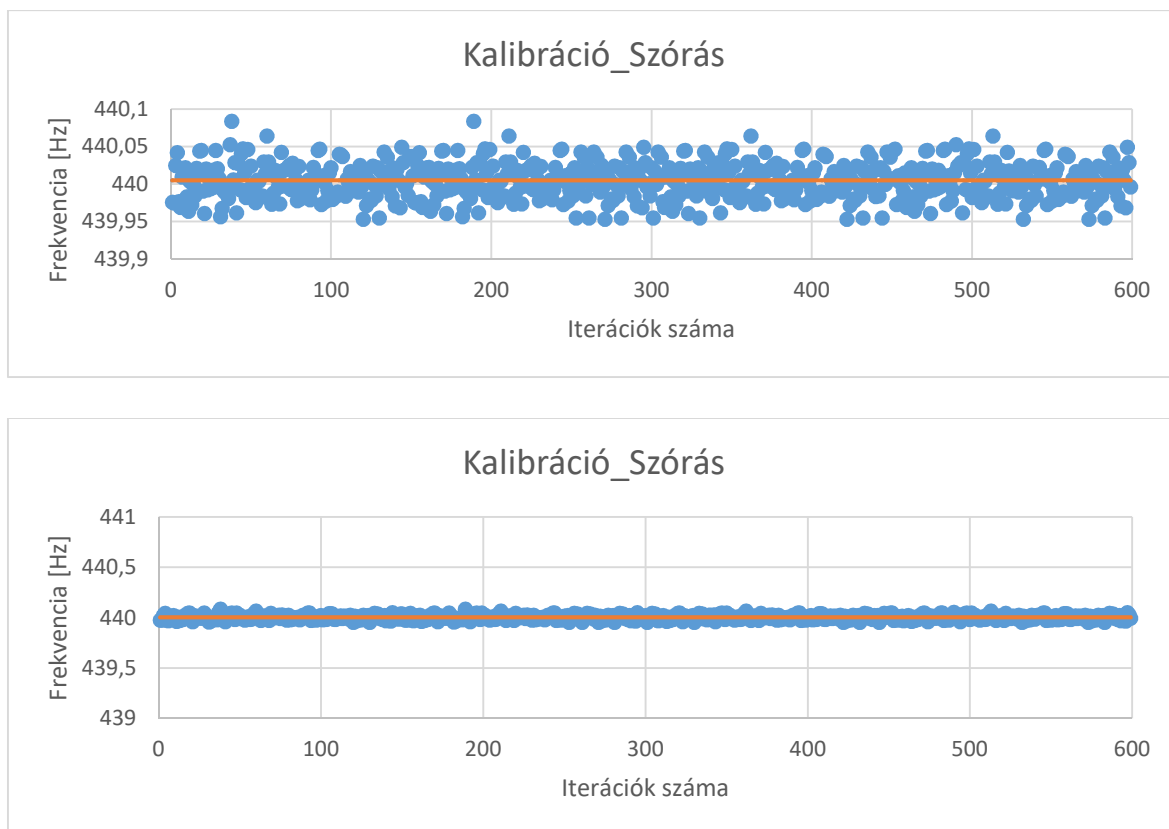


33.ábra. LabVIEW kalibrációs front panel



34.ábra. LabVIEW kalibrációs block panel

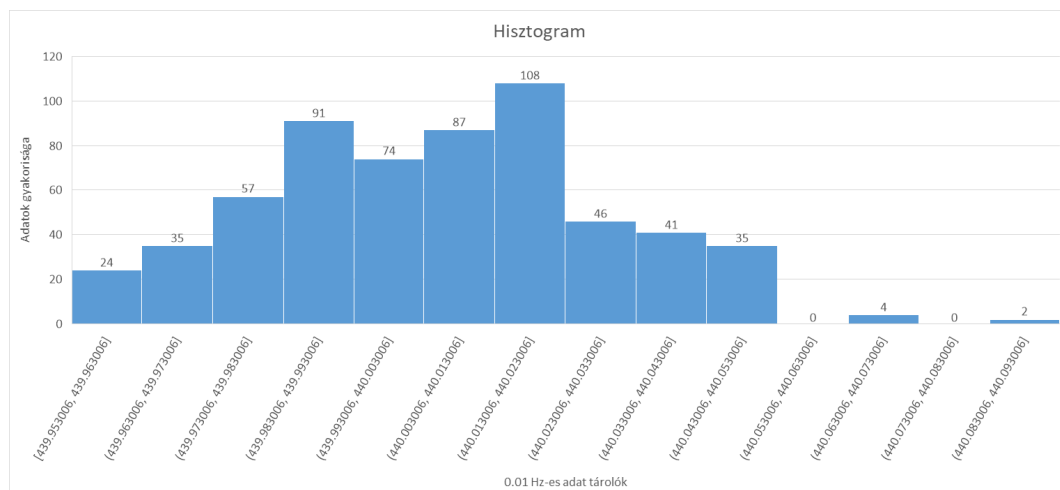
A kalibrációs programot 3 fő részre lehet bontani. A program első részeként létrehoztam egy iterációk kontrollt és iterációk indikátort amelyek, ha egyenlőek akkor leállítják a program futását. A második részben a myDAQ feszültségek érzékelése céljából a DAQ Assistant express VI-t használtam, majd a frekvenciára való átváltás érdekében pedig egy Tone Measurement express VI-át helyeztem el. Ezzel a két express VI-al már a frekvenciát lehetőségünk van megjeleníteni egy indikátoron. Az Excel fájl létrehozását a Write to Measurement File teszi lehetővé. Itt a beállításokban a kisebb memória felhasználás miatt a már létrehozott fájl újra írását jelöltem ki így, ha újra elvégeznénk a kalibrációs folyamatot, ugyan azt a fájlt kell megkeresni, amit előzőleg már használtunk.



35.ábra. A kalibrációs mérés első 600 adatának szórása grafikonon

Az Excel táblában 600 adattal dolgoztam, amelynek eredményeként 0.024130143 lett a mikrofon szórása, 440Hz-re vizsgálva. A jobb átláthatóság érdekében készítettem egy grafikont, amelyen a 600 adat szórását reprezentáltam. A mérés eredménye nem mutatott nagyobb eltérést, így nincs szükség az áramkör vagy a program változtatására. Az adatot a továbbiakban a mérési programban is felhasználtam.

Az adatokat továbbá átlag medián, minimum és maximum alapján is elemeztem, minél átfogóbb képet kapjak a mérési pontosságról és lehetséges eltérésekről. Az átlag érték 440.0048 HZ, ami szinte tökéletesen megfelel a referenciafrekvenciának, ebből következően a mikrofon mérési eredményei elég stabilnak tekinthetők. A medián érték a 440.0054 Hz, ami arra utal, hogy az adatok eloszlása közel szimmetrikus, és a középső érték is nagyon közel áll az átlag értékhez, tovább erősítve a pontosságot. A minimum és maximum értékek, 439.953 Hz és 440.0837 Hz, a mérési tartomány alsó és felső határát jelölik, és mutatják a mikrofon mérési tartományának csekély ingadozását. A kis eltérés továbbá jól mutatja, hogy a mikrofon felbontása jó, és hogy képes stabilan reprodukálni a mért frekvenciát.



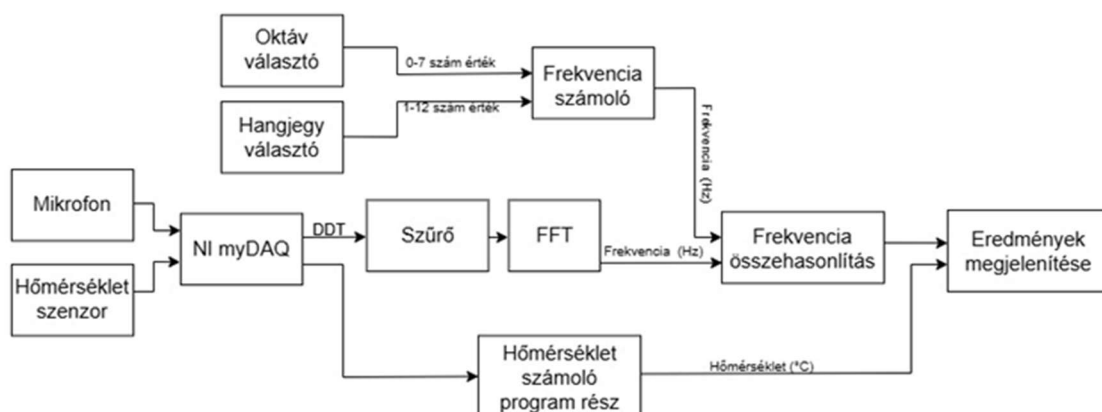
36.ábra. A kalibrációs mérési eredmények hisztogramja

A hisztogram segítségével megtekinthetjük a mérési eredmények vizuális formában is, akár csak a szórás esetében. Látható, hogy az adatok nagy mértékben koncentrálódnak az átlag köré. Továbbá mutatja a már előbb említett szimmetriát az átlag körül, ami jelzi, hogy nincsen nagyobb eltolódás a mérési hibák tekintetében. Ez kedvező eredmény a mérési pontosság szempontjából, hiszen egy frekvencia egy analízisre használt mikrofon esetében kritikus, hogy a mérések, ismételhetők legyenek és az értékek szorosan kövessék a valódi értékeket.

A mérések nagy része egy normál eloszlás esetén az átlag ± 2 szóráson belül helyezkedik el, amely a mérési eredménynek 95%-át fedi le. Ezért, ha programozás során a szórás értékének kétszeresét visszük be a programba, akkor biztosítva van, hogy a mérések túlnyomó része (95%-a) ezen belül marad. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy csak akkor jelezzen eltérést a rendszer, ha valóban jelentős különbség adódik az alaphanghoz képest. Továbbá minimálisra csökkenthető általa az ingadozások által jelzett hamis piros jelzések száma.

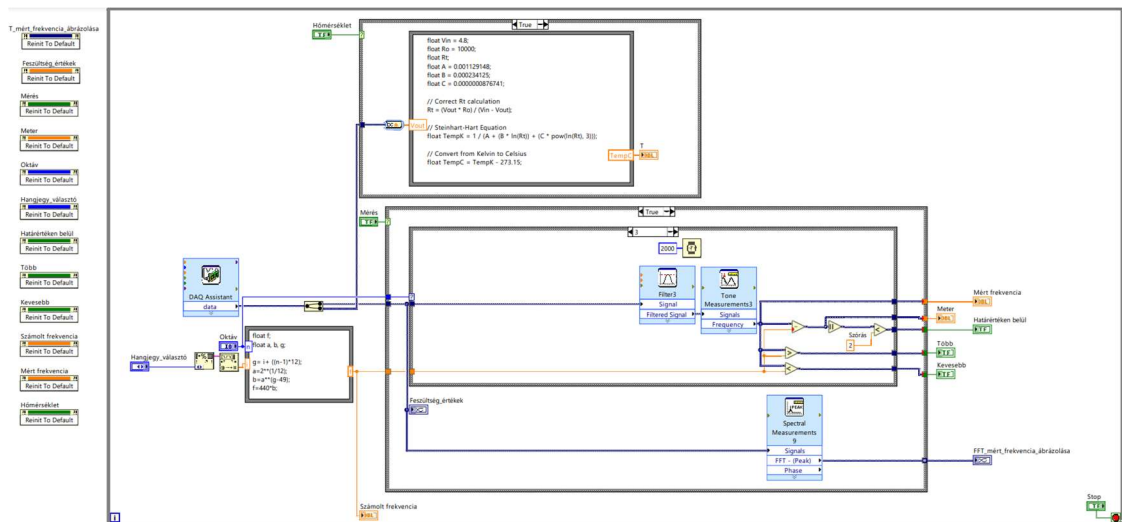
Mérési program

A mérési program működési menete a következő: a felhasználó elindítja programot majd az oktáv és a hangjegy választóval kiválasztja, hogy a zongorán hányadik oktávval és ott melyik hanggal szeretne foglalkozni. Ennek a biztos ellenőrzésére az oktáv választó felett megjelenik a frekvencia tartomány, amely a kiválasztott hangjegyre vonatkozik. Ezt követően el lehet indítani a mérést, a mérés gombbal, melynek megnyomásával, a program megjeleníti az analóg porton keresztül mért feszültséget, az idő és a frekvencia függvényében. A frekvenciát a LabVIEW programban a Tone measurement Express VI-jal jelenítjük meg. A frekvencia függést a Spectral measurement Express VI-jal, Fast Fourier Transformation-el, gráf kijelzőn lehet megtekinteni. A mért feszültséget ezután egy Case struktúrába vezetve feltételek között vizsgáljuk, az eredmény pedig megjelenik a LED visszajelzőkön annak függvényében, hogy a mért frekvencia milyen viszonyban áll a vizsgált frekvenciával.

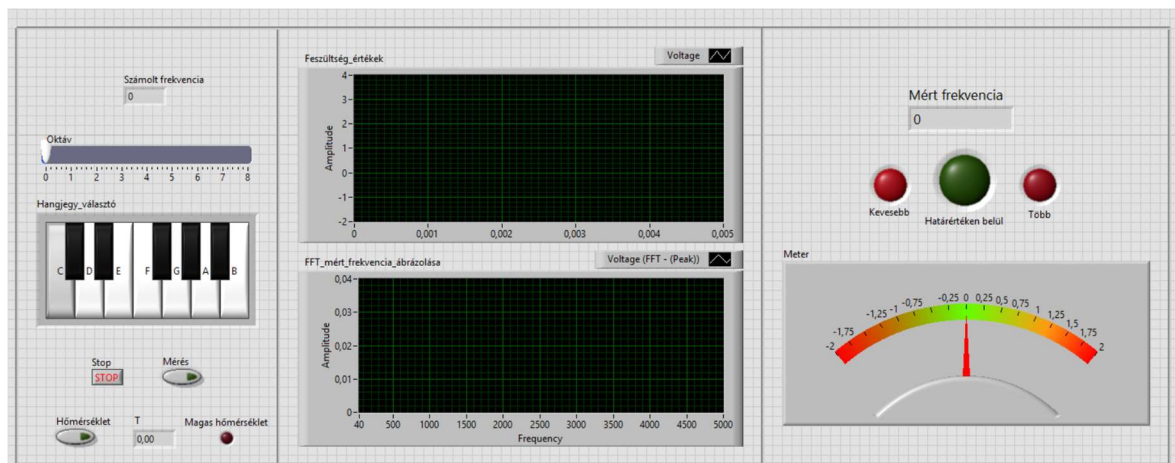


37.ábra. LabVIEW program blokk diagramja

36.ábra lényegesen egyszerűbben bemutatni a LabVIEW program felépítésének fontosabb elemeit, ez által átláthatóbbá válik a program működése is.



38.ábra. LabVIEW mérési block diagram



39.ábra. LabVIEW megjelenítési front panel

A LabVIEW program részekre bontva

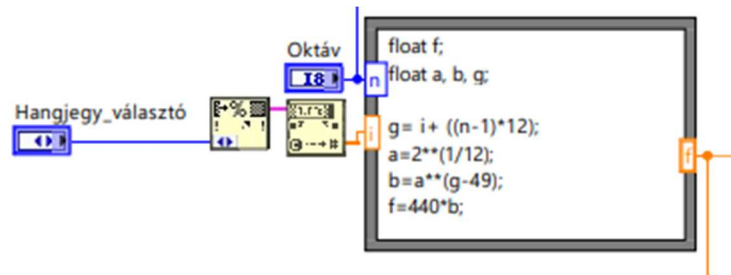
A program egyik legfontosabb részlete, a frekvencia kiválasztás. Ennek segítségével tudjuk beállítani, hogy milyen tartományt kell a programnak megfigyelnie. Amennyiben ez a rész nem lenne a program példának okáért egy teljesen elhangolódott zongora esetében, egy másik hangra, amely legyen az C1 és 440 Hz-en, de mivel nem tudjuk, melyik tartományt (hangot) vizsgáljuk, így jelezhetné, hogy a hang frekvenciája megfelelő. Azonban mivel az előkiválasztáson megadjuk, hogy a C1 frekvenciája 32,7 Hz, így ez a hiba nem jöhet létre. A hangok és frekvenciák kiválasztására grafikus szemléltetést választottam, ezzel könnyítve és felhasználó barátabbá téve a programot.

A „Hangjegy_választó”- a billentyűk kaptak egy értéket, a nulla és első oktávban elhelyezkedett helyük alapján, ez a változó lett az „i”, az oktáv számát pedig „n” jelöli.

Ennek a két adatnak a segítségével az összehangjegy sorszáma kiszámítható a következő „g” változó által jelölt képlettel, amelynek lényege, hogy az „i” bármely hang első vagy nulladik oktávban elhelyezkedett helye, (n-1) az oktáv száma, amely egy szorzó tényező lesz, és hogy akár három oktávval később is jó frekvenciát mutasson, ezért egy egész oktávnyi hanggal kell szorozni az eltolás érdekében. Egy oktávban 12 hangérték van, tehát 12 hangból áll egy oktáv, ezért ezzel a számmal szorozva az oktáv sorszámát megkaphatjuk, hogy hányadik hangról beszélünk. Így tehát a „g” a hangjegy zongorabillentyűn elhelyezkedő sorszámát jelenti, amelyből

$$f(n) = 440 * (\sqrt[12]{2})^{n-49}$$

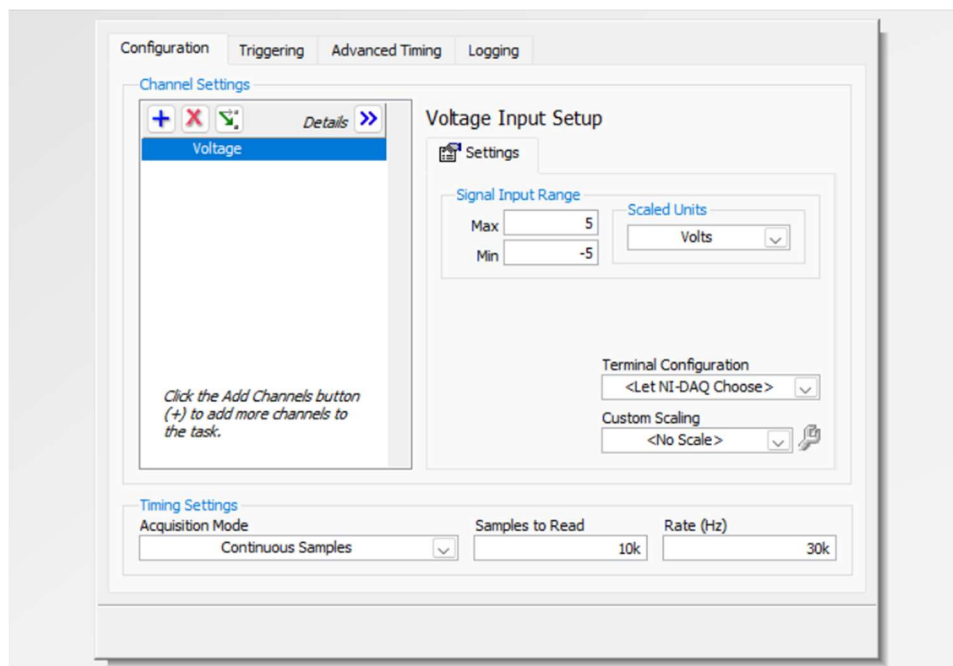
f(n) képletet használva és kicsit matematikailag átalakítva kapjuk meg a vizsgálni kívánt frekvencia értékét.



40.ábra. blokk vázlat frekvencia kiválasztásának részlete

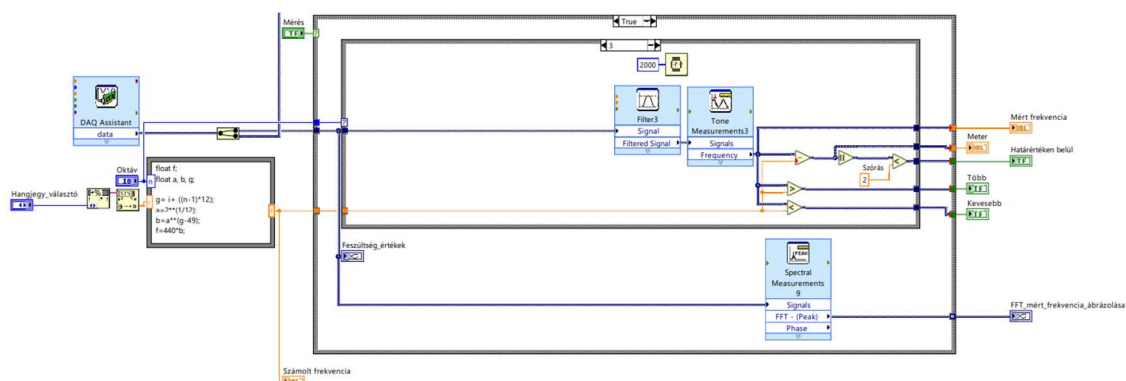
Formula Node számításának eredményét (f) pedig egy indikátor a front panelen is megjeleníti.

A következő nagy részegység magával a jelfeldolgozással foglalkozik, ennek a működését részben már a kalibrálási folyamatnál említettem. A mérés gomb lenyomásával, a program megjeleníti az analóg porton keresztül mért feszültséget, az idő és a frekvencia függvényében. Ennek elektronikai alapja, hogy a mikrofon a myDAQ AI1- és AI1+ bemeneteire van bekötve, ahol a AI1- a földre van kötve. A feszültség jeleket a mikrofon a 0-5V között állítja elő.



41.ábra. myDAQ assistant beállításai

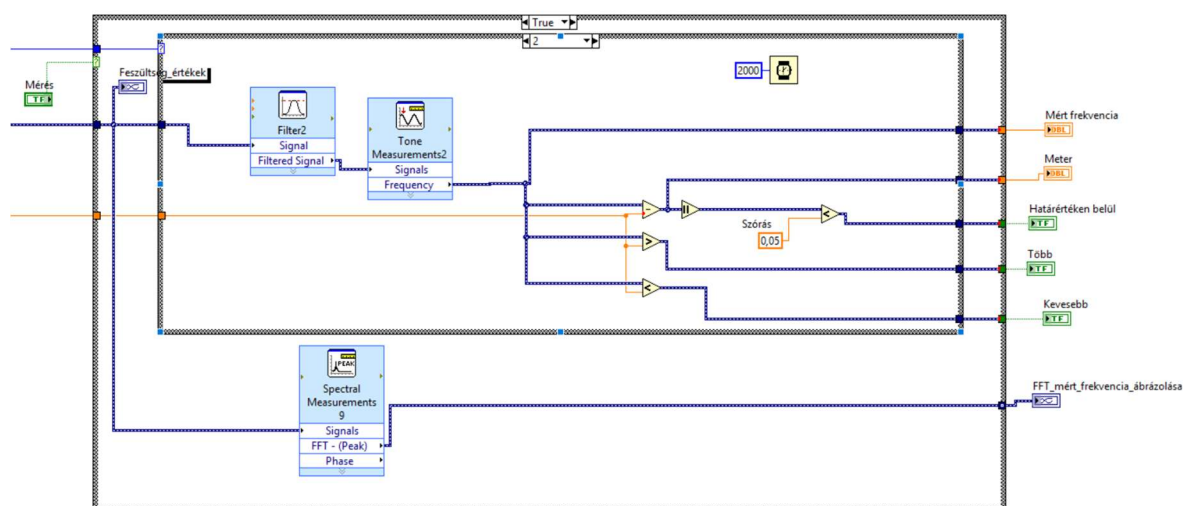
Analog folyamatos jelről beszélhetünk a hangok esetében ezért ennek megfelelően ezt is kellett beállítani a DAQ Assistant konfigurátorban. A mintavételezési frekvencia a legnagyobb frekvencia kétszeresénél is több. A zongorán elhelyezkedő legmagasabb hang a C8 a maga 4186,01 Hz-ével, így a mintavételezési frekvenciát 10 kHz-nek választottam, a mintavételezési törvényenk megfelelően. Majd ezeket a jeleket a DAQ Assistant, a Tone mesurment-nek továbbítja, ahol kiszámítódnak a frekvencia értékek, majd ezt megjelenítjük mért frekvencia, numberikus indikátorban. Azonban szerettem volna látni a frekvenciákat és hozzájuk tartozó felharmonikusokat egy grafikonon, ezt pedig a Spectral mesurment FFT-számítással és egy grafikon kijelzővel lehet megtenni.



42.ábra. A blokk panel frekvenciamérő egysége

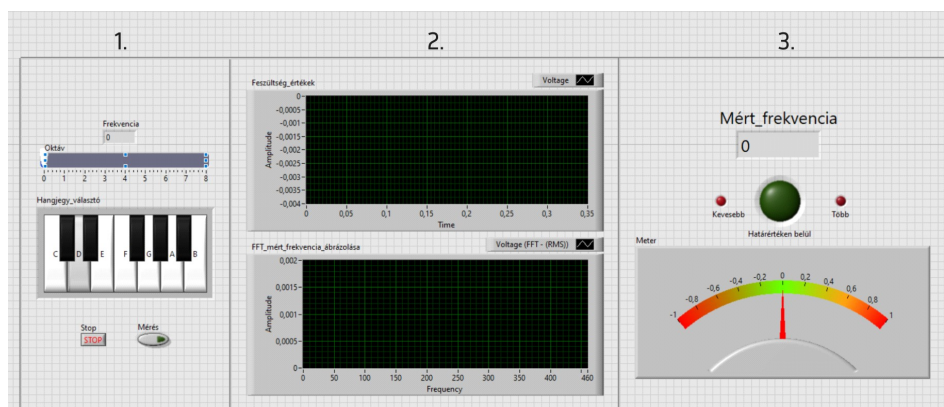
A program harmadik részegysége szorosan kapcsolódik a már előzetesen elvégzett kalibrációs folyamathoz. Az ott kapott eredményt ebben a programrészbe volt szükséges

beépíteni. Azonban előtte megvizsgáljuk, a mért frekvencia értéket és egy szűrő filterrel oktávonként szűrjük a felharmonikusokat, hogy minél inkább az alaphang frekvenciáját tudjuk kimérni. Az előzetesen kiválasztott frekvencia értéket egy kivonással összehasonlítjuk a mért értékkel majd, ha van eltérés, annak függvényében, hogy ez pozitív vagy negatív felvillan a hozzájuk tartozó LED. Amennyiben a mért érték a kalibráció alapján számított szórás-érték kétszeresét is beleértve határértékeken belül mozog akkor a zöld „határértéken belül” LED villan fel. Azonban a különbség értéke egy pozitív szám ebben az esetben a frekvencia kiválasztott értéktől nagyobb értéket vesz fel, ha pedig a különbség negatív számot észlel, akkor a hang frekvenciája kisebb, mint a kiválasztott. A „meter” nevű kijelző a gyors változásokat követését hivatott könnyíteni, a vizsgálat során.



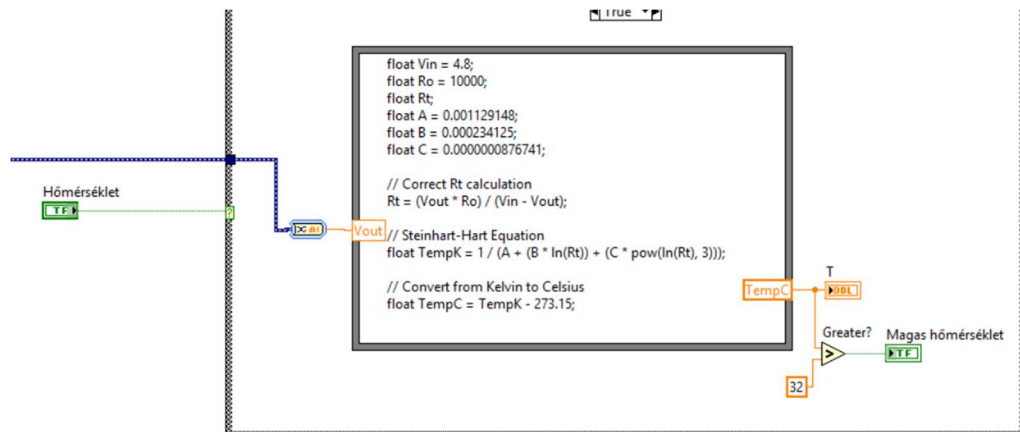
43.ábra. A mérések és keresett frekvencia összehasonlításának Block panele

A mérés befejeztével a stop gombbal az egész program leállítható. Az indikátorok és gombok pedig minden újra indítással visszakerülnek az alapállapotukba.



44.ábra. A program front panel

A program front panel-e is három funkciójában eltérő részre osztható. Az első rész logikusan az a hely, ahol a felhasználó vizuálisan betudja táplálni milyen hangot, szeretne vizsgálni. A második részben a beérkező feszültségértékek és az érzékelt frekvenciák és felharmonikusaik megjelenítésére szolgáló gráfok kaptak helyet. A harmadik partícióban pedig a feldolgozott és kiértékelt jel megjelenítését találhatjuk, ahol a program pontosan és egyértelműen jelzi, hogy az érzékelt frekvencia határértéken belül vagy kívül van-e, ha pedig kívül helyezkedik el az negatív vagy pozitív irányú az eltérés.

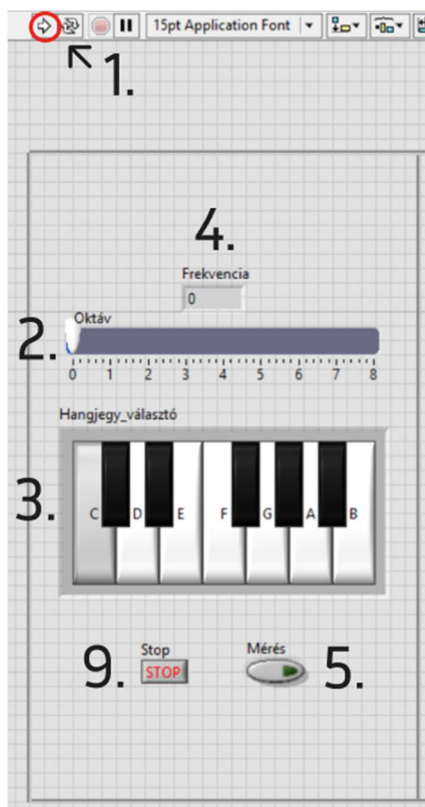


45.ábra. Hőmérséklet méréshez tartozó program részlet

A hőmérséklet mérés kezdete is a DAQ Assistant-tal indul, ahol a myDAQ az analóg hőmérsékletmérő modul feszültség érték figyeli. Ebből az értékből a Formula Node segítségével kiszámoljuk az hőmérséklet szenzor ellenállását, a bemeneti és kimeneti feszültségéből a szenzornak, illetve a modulon található 10 k Ω -os ellenállás értékéből. Majd következik maga a hőmérséklet kiszámítása, amelyhez hozzátartoznak az A, B, C konstansok, amik a hőmérséklet szenzorhoz tartozó exponenciális görbe meredekségét adják meg, és a segítségükkel határozhatjuk meg az ellenállás értékhez tartozó hőmérsékletet. A Formula Node utolsó sora, pedig a hőmérséklet Kelvinből való Celsius fokba való átváltásának számítását írja le.

Használati útmutató a felhasználónak

- LabVIEW program megnyitása, majd az „File - open project”-en belül a zongora hangoló kiválasztása. A projekten belül először a „Fő_program” nevezetű VI-t kell megnyitni! Ez a programmal kell elvégezni a kalibrációs folyamatot.



46.ábra, mérési adatok beállítása

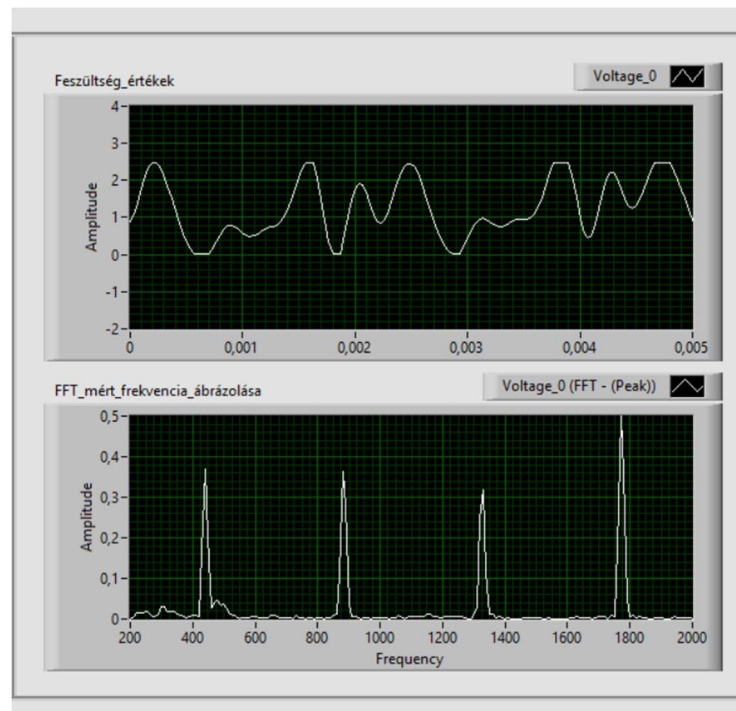
1. ponton belül megjelölt kis nyíl megnyomásával már futtathatjuk is programot. majd ezután a második pontnál megjelölt „oktáv” nevű csúszkán kiválaszthatjuk, hogy a zongorabillentyűnek milyen szekciójából kívánunk választani. Ezt követően a hármassal megjelölt „hangjegy_választó” területen a virtuális billentyű lenyomásával kijelöljük, az adott oktávon belül, melyik hangot szeretnénk mérni, amelyre a megerősítés érdekében felül a 4. pontnál Frekvencia név alatt megjelenik a keresni kívánt frekvencia értéke Hz-ben. Miután mindent beállítottunk a Mérés gombra kattintva (5.) program elkezd megjelölni a beérkező hangokat.



47.ábra, kiértékelő panel

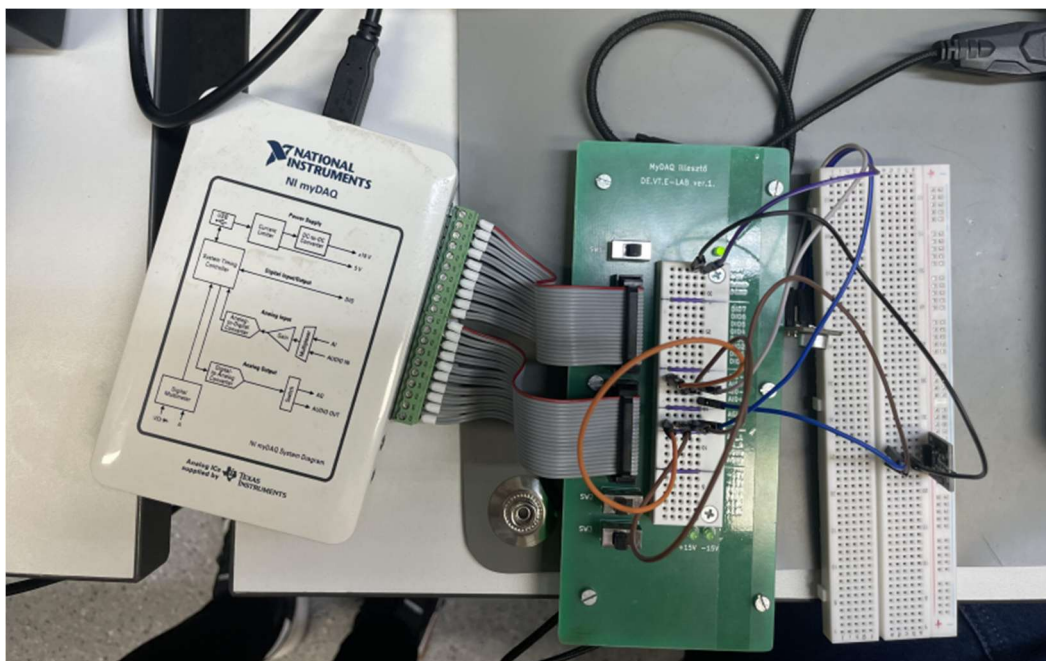
A „mért_frekvencia” rész alatt megjelenik az éppen mért frekvencia értéke. Ez a frekvencia attól függően mit állítottunk be előzetesen (milyen hangot keresünk) és milyen értéket mutat ehhez képest az eszköz, annak függvényében változtatja 7-8. ábrán látható kijelzőket negatív irányba, ha kisebb; pozitív irányba, ha nagyobb frekvenciát érzékel. Ezeknek az értékeknek a tudatában egyhangoló kulccsal tudjuk állítani a zongora hangzását és jó hangolás esetén a zöld „határértéken belül” LED világít a programban.

A program harmadik részlete nagyobb szakértelmet igényel mind zenei mind elektronikai tudást tekintve. A felső grafikus kijelzőn a mért feszültséget az idő függvényében figyelhetjük meg, amin láthatjuk, hogy a zongora milyen hanghullámokat bocsájt ki. A másik kijelzőn, a frekvenciák spektrumát láthatjuk. Itt megfigyelhetők az adott hangokhoz tartozó felharmónikusok is, amelyek egyes esetekben segítségünkre lehetnek finomhangolás során.



48.ábra, Grafikonok a programban

Amennyiben elvégeztük a szükséges méréseket, a mérési adatok beállításánál található STOP gombbal leállíthatjuk a mérést, és bezárhatjuk a programot.



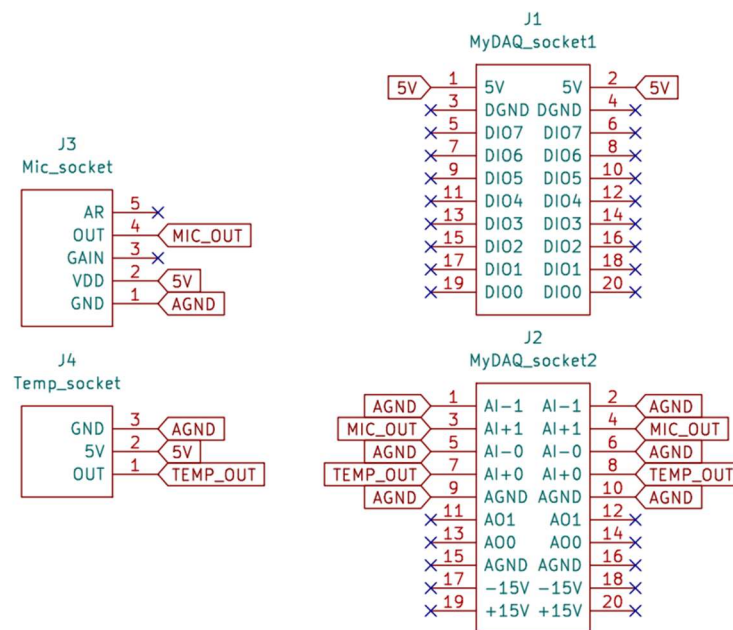
49.ábra. Próbapaneles mérési összeállítás

A mérési megvalósítás a kezdeti fázisban próbapanelen állítottam össze, annak érdekében, hogy ha bármilyen változtatást kellene eszközölni, akkor azok könnyen

kivitelezhetőek legyenek. Ehhez nagy segítségemre volt az egyetemtől kapott próbapanel, amelyeken egyértelműen fel vannak tüntetve a sorokhoz tartozó portok, amelyek szalag kábelben csatlakoznak myDAQ-hoz. Ezzel az összeállítással, könnyen lehetett tesztelni a program működőképességét.

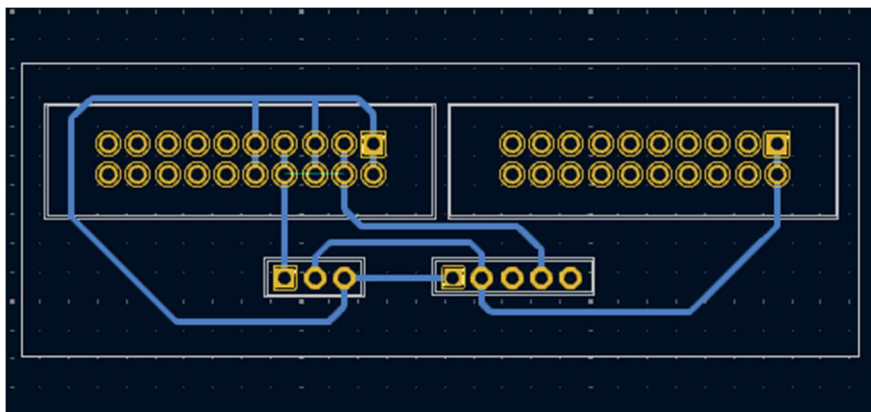
Miután minden az elvártaknak megfelelően működött, a program hibamentesen futott és a vezetékek bekötése is megfelelőnek látszódott elkezdődhetett a PCB tervezés fázisa.

Gyakorlati megvalósítás



50.ábra. KiCAD-Schematic editor-ban elkészített kapcsolási rajz megvalósítása

A PCB tervezését KiCad programban valósítottam meg. A gyakorlatban számomra a PCB-n csak a csatlakozók helyét és huzalozását kellett megterveznem amelyek a szenzorokhoz csatlakoznak. Első lépésben a Schematic editor-ban elkészítettem a csatlakozók kapcsolási rajzát. Majd az ERC ellenőrzés után ezt a rajzot áttöltöttem a PCB editor felületre.



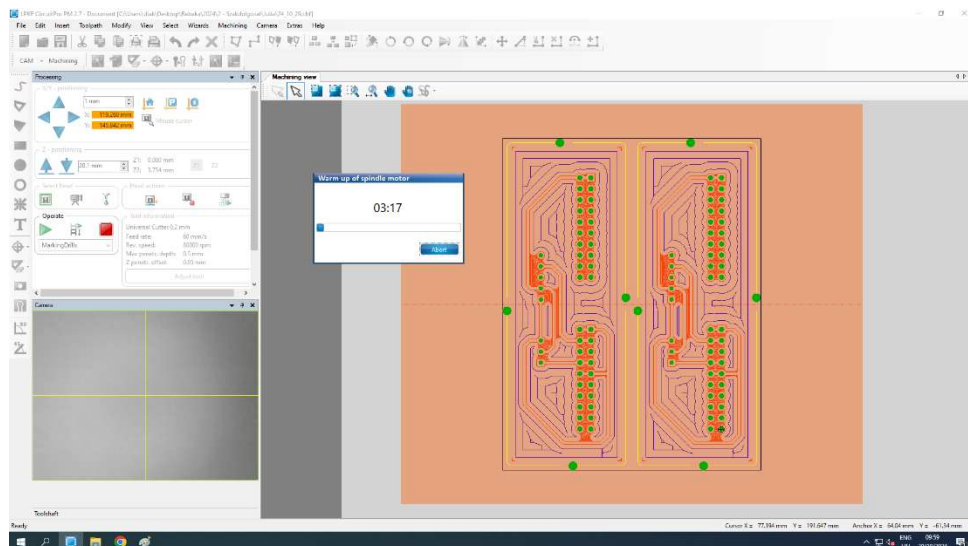
51.ábra. KiCAD-PCB editor-ban megvalósított PCB terv

A PCB-editor előnye, hogy a már előzetesen megadott vezetősávok csatlakozási helyeit pontosan megadja a huzalozáshoz. Így a csatlakozókat már csak el kellett helyezni a felületen, lehetőleg úgy, hogy azok minél kevesebb helyet foglaljanak el, és így minél kisebb legyen a nyomtatott áramköri lap. Majd következett a PCB tervek legenerálása, hogy az egyetemi laboratóriumban, el lehessen készíteni a tényleges nyomtatott áramköri lapot.



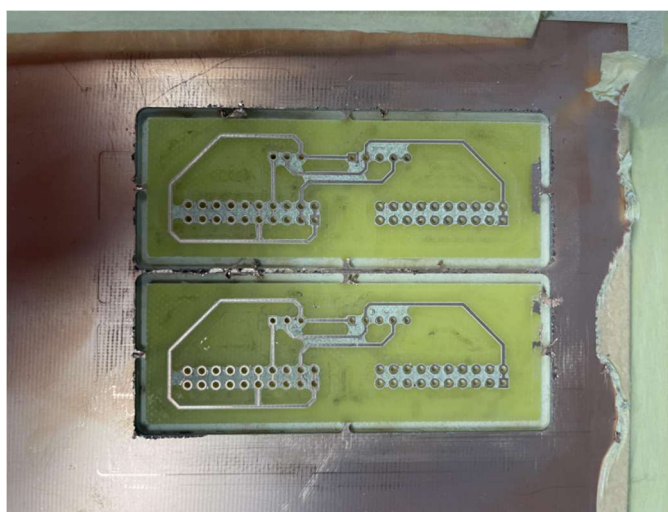
52.ábra. Folyamat ábra az éppen készülő PCB-ről

A nyomtatott áramkörhöz az egyetemen található LPKF ProtoMat S10-es CNC-alapú nyomtatott áramkör gyártógépet használtam. Amely képes furatok készítésére, és mechanikai marásra a rézrétegek, a vezetősávok kialakításra. Így a PCB elhelyezés és rögzítése után, a betöltött fájlok alapján képes elkészíteni a nyomtatott áramköri lapokat.



53.ábra. Nyák elkészítéséhez szükséges program folyamat képe

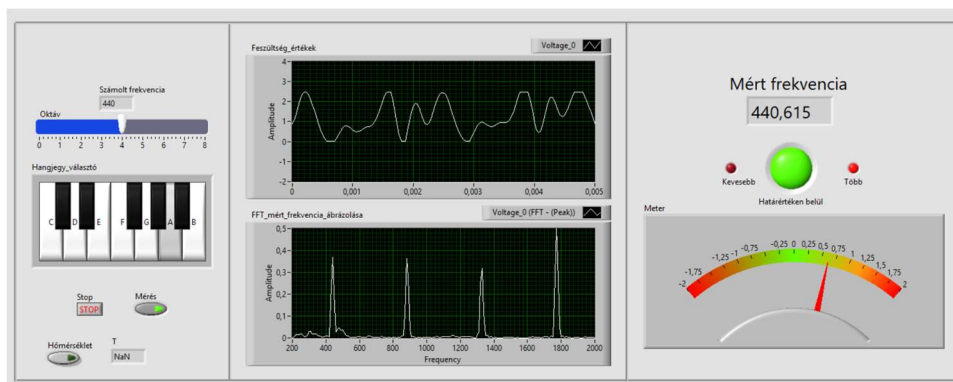
A képen láthatóak narancssárga színnel, a vezetősávok kimarásukhoz szükséges marási útvonalak, amelyek kék színnel vannak jelölve a nagyobb felületek kimarásának útvonalai. A zöld színnel jelzett pontok pedig a furatok helyét jelölik, amelyek a csatlakozókhoz tartoznak. A PCB körvonala pedig citromsárga színnel van kirajzolva.



54.ábra. az elkészített PCB, tisztítás és forrasztás előtti képe

Miután elkészült a nyomtatott áramköri lap, egy felületi tisztítás következett, amely a forrasztás előtt mindenképp szükséges, hogy a felületi szennyeződések eltávolítsuk. Majd elhelyeztem a szenzorokat az áramkörön, ezt követte egy elektronikai ellenőrzés, amellyel megbizonyosodtam arról, hogy minden vezetősáv csatlakozik a megfelelő pontra. Ezt követően pedig leellenőriztem, hogy a szenzorok kivezetései és a vezetősávok megfelelő helyen találhatóak-e.

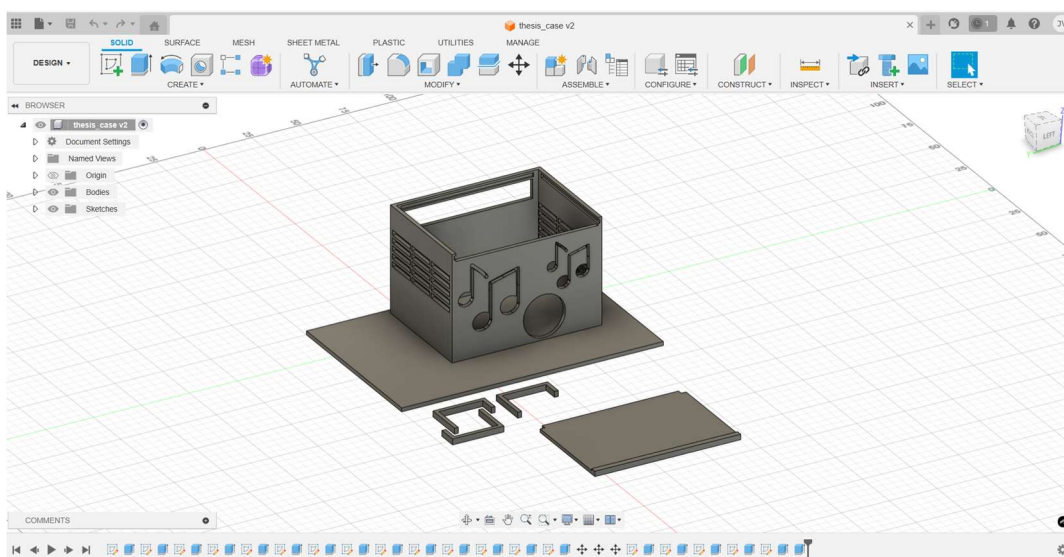
Ezután következett a csatlakozók tokjának beforrasztása, amelyet kézzel végeztem el és egy rövid vizuális vizsgálat után összecsatlakoztattam a PCB, a myDAQ-kal. Ezután következett egy próbamérés, hogy megbizonyosodjunk arról, hogy áramkör az elvárásoknak megfelelően működik.



55.ábra. végső próba mérés eredménye

A végső mérés eredmény jól látható a front panelen. Minden funkció, amelyet a programnak el kell látni a kiválóan működött, a hanghullámok és a felharmonikusok is tökéletesen megjelennek a diagrammokon és a mért frekvencia is leolvasható.

A megvalósítás utolsó lépéseként, pedig terveztem az áramkör védelme és a biztonságos hordozhatóság érdekében egy tokot, amellyel az egész rendszer könnyen hordozható a MyDAQ-kal együtt.



56.ábra. Autodesk Fusion 360 programban a megtervezett tok képe

A tok megvalósítását úgy terveztem, hogy PCB és szenzorok, elegendő nyílást és teret kapjanak az környezeti információk méréséhez. Ehhez a tok elején és oldalán több nyílást is hagytam számukra. A PCB rögzítésére, csavarokat és hozzátartozó rögzítési pontokat hagytam a ház belsejében, illetve a ház hátulján található egy nagyobb nyílás, amelyen keresztül myDAQ szalagkábele könnyedén tud csatlakozni.



57.ábra. Nyomtatás folyamata

A 3D nyomtatást az egyetemi laborban található Bambu Lab A1-es 3D nyomtatóval valósítottam meg. A nyomtatás sikeresen végbe ment, és már csak a mérési áramkör elhelyezése maradt a tok belsejében.

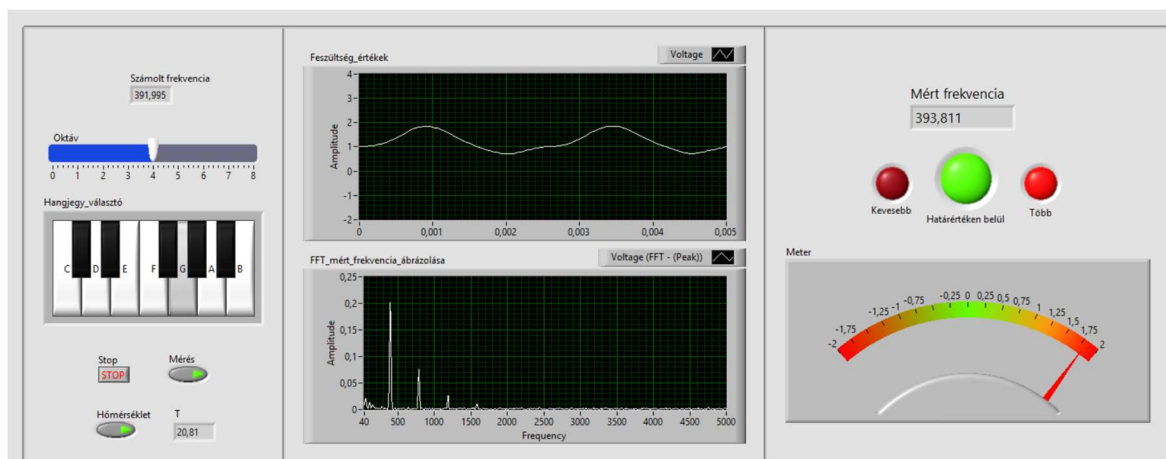
Összefoglalás

Az előzetes és próbaméréseket főleg, tiszta frekvenciákon és zongora hang szimulátoron végeztem. Azonban szerettem volna a rendszert egy valós zongorán is kipróbálni, hogy milyen eredményeket kapok a mérés során. Lehetőségem volt egy kissé elhangolt zongorát tesztelni.



58.ábra. Zongorán végzett mérés

A mérések megfelelő eredményt adtak: a rendszer pontosan detektálta az alaphangokat és kevesebb felharmónikust érzékelt, és az alaphang amplitúdója volt a legmagasabb minden esetben. Kiszűrte a hamisabb hangokat a vizsgált hangszernél, amelyeket egy referencia zongora esetében (amely hangolva volt), sikeresen mutatta jó értéket, így bizonyítható volt, hogy abban az esetben valós volt az eltérés. Ez a jelenség főleg a középső és felső tartományban volt jellemző. Továbbá a rendszer sikeresen jelezte a hőmérsékletet, amelyet képes volt detektálni.



59.ábra. G4 mérési eredmény

A mérési folyamat sikeresnek tekinthető, az elvárható működést teljesítette. A hangokat képes volt érzékelni és kijelezni az eltéréseket. Gond nélkül és probléma mentesen volt képes futni és leállni a program.

A szakdolgozat elkészítése során a témához kapcsolódó szakirodalom alapos áttekintését végeztem el. Az irodalmi források feldolgozása során kiemeltem a projekt szempontjából legfontosabb információkat és koncepciókat, amelyekre a rendszer tervezése és megvalósítása épült. Ezek az alapelvek és meglátások biztosították a fejlesztés tudományos háttérét, valamint segítettek a releváns megoldás kidolgozásában.

A szakdolgozat célja egy olyan eszköz megtervezése és megvalósítása volt, amely képes a frekvenciák mérésére és vizualizálására. Az elkészült eszköz képes a frekvencia és hőmérséklet mérésére és vizualizálására. A rendszer nemcsak a mért értékeket jeleníti meg, hanem azokat összeveti az előre meghatározott, elfogadott frekvenciaértékekkel, biztosítva a pontosság ellenőrzését. A program kezelőfelületén egyértelműen láthatóak az eredmények, ami részletes képet nyújt a hangszer aktuális állapotáról. Emellett az eszköz integrált hőmérsékletmérési funkcióval rendelkezik, mivel a hőmérséklet jelentősen befolyásolja a hangolás tartósságát. A program kijelzőjén ezért a frekvenciák mellett a hőmérsékleti adatok is megjelennek, lehetővé téve a hangszer állapotának még precízebb elemzését és a problémák hatékony megelőzését.

Összeségében a rendszer sikeresen képes a frekvenciák felismerésére, azonban bizonyos esetekben többszöri próbálkozásra volt képes a frekvenciákat pontosan mérni. Ezt a hibát valószínűleg egy magasabb minőségű mikrofon használatával könnyen orvosolni lehetne. A rendszer továbbfejlesztése során érdemes lenne fontolóra venni a hőmérséklet-érzékelő szenzor cseréjét, illetve egy olyan megoldás beépítését, amely lehetővé teszi a

páratartalom mérését is, hiszen ez is fontos környezeti paraméter lehet hosszútávon. Továbbá tovább fejlesztési területet ad a mobilizáció fejlesztése, mert bár a rendszer elfér egy zongora tetején, de a könnyebb hordozhatóság nagy kényelmi előnyt jelenthetne. A projekt során szerzett tapasztalatok alapján elmondható, hogy a rendszer jó alapot nyújt a további fejlesztésekhez, és megfelelő finomhangolással még pontosabb, stabilabb eredmények érhetőek el.

Irodalom jegyzék

- [1] Nicholas J. Giordano. (2010). Physics of the Piano. Oxford University Press
- [2] Prof. Dr. habil. Duffek Mihály egyetemi tanár Debreceni Egyetem Zeneművészeti Kar:
A zongora szerkezeti felépítése és karbantartása
- [3] <https://audreywilliamsmusic.wordpress.com/2013/01/03/piano-pedals/>
- [4] <https://katicaenekorai.wordpress.com/2021/03/25/a-zongora/>
- [5] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Pian%C3%ADn%C3%B3>
- [6] Martin Keane. (2007). Improving the upright piano. Acoustics Australia
- [7] Dr. Csákány Csilla egyetemi adjunktus. Zeneelméleti alapismeretek.
- [8] <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Harpsichord>
- [9] <https://www.britannica.com/art/harpsichord>
- [10] <https://digitaltmuseum.no/011022848697/klavikord>
- [11] <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/501788>
- [12] <https://audreywilliamsmusic.wordpress.com/2013/01/03/piano-pedals/>
- [13] <https://www.carousell.sg/p/kohler-campbell-upright-grand-piano-1247328059/>
- [14] J. Cree Fischer (2006) Piano Tuning: A Simple and Accurate Method for Amateurs
- [15] <https://www.nolapiano.com/blog/tag/ETD>
- [16] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
- [17] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [18] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- [19] <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- [20] <https://cb-electronics.com/products/ky-013/>
- [21] <https://www.mediacollege.com/audio/microphones/dynamic.html>

- [22] <https://www.mediacollege.com/audio/microphones/condenser.html>
- [23] Farshad Arvin, Shyamala Doraisamy (2009). Real-Time Pitch Extraction of Acoustical Signals Using Windowing Approach
- [24] <https://method-behind-the-music.com/mechanics/physics/>
- [25] <https://kandmmusicschool.com/blogs/piano-lessons/the-role-of-temperature-and-humidity-in-piano-tuning-stability/>
- [26] <https://www.wwdmag.com/utility-management/article/10977314/7-basic-types-of-temperature-measuring-sensors>
- [27] <https://byjus.com/physics/absolute-humidity/>
- [28] <https://finetuningco.com/blog/aural-vs-electronic-piano-tuning>
- [29] <https://www.acs.psu.edu/drussell/Piano/Dynamics.html>
- [30] <https://borgoltz.aoe.vt.edu/aoe3054/manual/inst3/MyDAQ.pdf>
- [31] <https://www.circuitbasics.com/analog-to-digital-converters/>
- [32] <https://www.northstarsensors.com/calculating-temperature-from-resistance>
- [33] <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>
- [34] <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/ntc-thermistor>
- [35] <https://forum.arduino.cc/t/ntc-like-ky-013-but-with-100k/428988>
- [36] https://www.muziker.hu/korgtm70tblack?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAls5BhDeARIsABRc6Zt1j41rq__y5NM5pwsSxWknnRc6eAiKpnmJ7llh8XEf_hlrJy41J0aAmCSEA_Lw_wcB
- [37] <https://ptgfoundation.org/museum/electronic-tuning-devices/>
- [38] <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/INMP441.pdf>
- [39] <https://www.datasheethub.com/ky-038-lm393-sound-detection-module/>
- [40] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX4465-MAX4469.pdf>