



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Husztik Dániel

**ERJESZTÉSSEGÍTŐ IPARI
ULTRAHANGOS RENDSZER
PROTOTÍPUSÁNAK
FEJLESZTÉSE**

KONZULENS

Dr. Sujbert László

BUDAPEST, 2018

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	7
1 Bevezetés	9
1.1 Bevezető.....	9
1.2 A rendszer létjogosultsága	9
1.3 Hasonló rendszerek.....	9
2 Technológiai áttekintés.....	11
2.1 Mikrobiológiai áttekintés	11
2.1.1 Az erjesztés fogalma, felhasználása.....	11
2.1.2 Az erjesztés folyamata	12
2.1.3 Szonoporáció	12
2.2 Fizikai áttekintés	14
2.2.1 Az ultrahang helye a hangok között	14
2.2.2 Előállítása.....	14
2.2.3 A szórófej helyettesítő képe.....	16
2.2.4 Az ultrahang felhasználása	17
2.2.5 Az ultrahang mérése	18
2.2.6 Az ultrahang biológiai hatásai	19
2.2.7 Akusztikai impedancia.....	19
2.2.8 Jelfeldolgozási megfontolások.....	19
3 A rendszerterv	22
3.1 Áttekintés a kiírás tükrében	22
3.2 Rendszerterv	23
3.3 Alkatrész választás.....	24
3.3.1 Processzor választás.....	24
3.3.2 A PWM IC	26
3.3.3 Ultrahang transzducer	27
3.3.4 Ultrahang generálása.....	29
3.3.5 Kapcsolóüzemű tápegység.....	30
3.3.6 Szenzorok.....	31
3.3.7 Visszajelzés.....	32
3.4 Kommunikáció Etherneten	33

3.4.1 A TCP/IP protokoll.....	33
3.4.2 JSON.....	33
3.4.3 Kommunikációs struktúra.....	34
3.5 Ipari védelem	36
4 Megvalósítás	37
4.1 Az elkészült prototípus leírása	37
4.2 Tervezés	38
4.2.1 Elméleti tervezés.....	38
4.2.2 Hardvertervezés	38
4.3 Élesztés, bemérés	39
4.4 Első mérések	40
4.4.1 Az elektronika vizsgálata.....	40
4.4.2 A szórófej vizsgálata.....	42
4.5 Kihívások, problémák.....	43
4.5.1 Hibák a bemérés közben	43
4.5.2 Árammérés tesztelése	43
4.6 Az ipari védelem megvalósítása	44
4.6.1 Ultrahangos transzducer vízállóvá tétele	45
5 Mérések az elkészült rendszeren	47
5.1 Mérések leírása	47
5.2 Mérőrendszer kialakítása	47
5.2.1 Mérőrendszer részei.....	47
5.2.2 Mintavételi probléma.....	49
5.3 Mérések szabad levegőn	50
5.4 Mérések vízben	52
5.4.1 Elvárások	52
5.4.2 A mérés	53
5.5 A mérések összehasonlítása.....	54
5.6 Következmények, konklúzió	55
6 Konklúzió.....	57
7 További feladatok	58
8 Irodalomjegyzék.....	59
9 Ábrajegyzék.....	61
10 Függelék.....	63

10.1 A felhasznált eszközök listája.....	63
10.2 A felhasznált szoftverek listája	63
10.3 A mérési elrendezés	64

Rövidítések jegyzéke

USB – Universal Serial Bus

PWM – Pulse Width Modulation

DNS - Dezoxiribonukleinsav

RNS - Ribonukleinsav

MOSFET - metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

IGBT - Insulated-Gate Bipolar Transistor

JSON – Javascript object notation

TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol

LPF – Low Pass Filter, Aluláteresztő szűrő

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Husztik Dániel**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet 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, 2018. 05. 27.

.....
Husztik Dániel

Összefoglaló

Az ember már régen megfigyelte, hogy bizonyos hanghatások hatással vannak egyes élő szervezetekre. Nincsen ez máshogyan az ultrahang esetében sem. Az 1950-es években kezdődtek azok a kutatások, melyek kimutatták, hogy azok a sejt kultúrák, melyeket szaporodás közben ultrahanggal kezeltek, máshogyan viselkedtek, mint a nem kezelt szaporulatok. Ezzel kezdetét vette az a hosszú kutatás sorozat, melynek azóta sincsen vége. Hogyan is lehetne az ember által oly nagyon kedvelt erjesztett élelmiszereket (és egyéb élvezeti szereket) gyorsabban, hasonló minőségben előállítani? Jelen dolgozat egy olyan berendezést kíván megtervezni és megépíteni, amely képes segíteni az ebben a témában kutatók munkáját.

Dolgozatomban először áttekintettem a rendszer tervezésének feltételeit, a fizikai alapokat. Külön foglalkoztam az ultrahang keltésével és mérésével. Megvizsgáltam az erjesztés működését is. Ezek után elkészítettem egy alapos rendszertervet. Ennek keretein belül először specifikáltam az elképzelt berendezést, majd kiválasztottam a leginkább megfelelő alkatrészeket és megoldásokat hozzá. Tekintettel arra, hogy ennek a rendszernek a teljes elkészítése túlmutat a dolgozat keretein, valós fizikai eszköz formájában ennek egy protípusa készült el. Ez azt jelenti, hogy a fontosnak ítélt funkciókat valósítottam meg, elhagyva néhányat, amit funkcionalitás szempontjából kevésbé szükségesnek ítélt meg. Részletesen ismerttettem ennek a kiválasztásnak és tervezésnek a menetét is. Az elkészült eszköz működését körültekintő mérések sorozatával vizsgáltam. Ezek után, csatlakoztatva egy ultrahangos transzducert, tesztek végzettem az elkészült rendszerrel, megmérve az eszköz funkcionális jellemzőit, és a szórófej iránykarakterisztikáját folyadékban és szabad levegőn. Ehhez a méréshez egy hidrofont is építettem. A mérés eredménye az elvártak szerint alakult, folyadékban a nagyobb terjedési sebesség miatt az iránykarakterisztika kiszélesedett.

A dolgozatban megtervezésre, és megvalósításra került egy olyan eszköz, melynek fő funkciója az, hogy képes ultrahangos szórófejeket meghajtani. Emellett árammérés, vizuális visszajelzés, és különböző csatlakozások kerültek kialakításra. A berendezés működőképesnek bizonyult, és a mérések alapján hatékony eszköz lehet szonoporációs berendezésekben.

Abstract

Humans observed long ago, that certain sounds have effects on living nature. This is the same in case of the ultrasound. In the 1950s researches have begun, that represented, that those cell cultures, which have been treated with ultrasound, behaved differently than those not treated. This was the beginning of a long line of researches that are still running. How can we produce fermented foods and other consumable goods faster in the same quality? This study plans and develops though a machine, which can help the researchers in this field.

In this study, at first I reviewed the basic questions surrounding this topic, the literature of the physical background. I specifically overviewed the production and measurement of ultrasound. I also overlooked the basics of fermentation. Next, I examined I provided plans for developing this system. In this process, I specified the equipment, made the choice among suitable hardwares and solutions. Regarding, that the full production of this device is limited by this study, only a prototype was brought to life. This means, that I only realized functions really needed, leaving those less important. I thoroughly explained the selection of functions and the planning process. The finally ready device was taken under serious inspection. After this, connecting an ultrasonic transducer, I measured functional features and the characteristic of the transducer in open air and in water. For this measurement, I made a hydrophone. The measurement turned out as expected, the bigger propagation velocity in fluids broadened the characteristic.

In the study, a device was planned and constructed, which is able to drive ultrasonic transducers. Besides this, it features current measurement, visual feedback and connectors for sensors. The device presented here was shown to be effective and working, and it can be a possible good basis sonoporation equipment.

1 Bevezetés

1.1 Bevezető

Ebben a bevezetőben ismertem a rendszer ötletének felmerülésének előzményeit, áttekintem létjogosultságát az ipari gyakorlatban, és megvizsgálom, milyen hasonló rendszerek és kísérleti leírások léteznek már.

Az erjesztés rendkívül sok élelmiszer, és egyéb fogyasztási cikk feldolgozásánál alkalmazott eljárás. Ezen eljárások közös tulajdonsága, hogy igen sok időt vesz igénybe maga az erjesztés, mivel az élesztősejteknek időre van szükségük, míg lebontják a cukrokat. Ennek a dolgozatnak a célja egy, az erjesztés idejének felgyorsítására készített kísérleti gépezet irodalmának átgondolása, és gyakorlatban való bemérése.

1.2 A rendszer létjogosultsága

Erjesztéssel készülő fogyasztási cikkek esetén az átlagos erjesztési idő igen magas tud lenni. Egyes alkoholos italok esetében akár a 3-4 hónapot meghaladja ez az idő. Ez alatt az idő alatt az adott tárolóegység le van foglalva, nem használható. Tekintettel a különleges körülményekre (hőmérséklet, sterilitás, nyomásállóság, savas-lúgos környezet) az ilyen erjesztésekre alkalmas tartályok komoly összegekbe kerülnek. Az erjesztés idejének felgyorsításának segítségével a termelékenység növelhető, és a tartályok kihasználtságának mértéke is fokozható. Bizonyos termékek esetében az erjesztési idő hossza a minőséggel mérhető össze, ezen esetekben azonos idő alatt jobb minőségű terméket lehet létrehozni.

1.3 Hasonló rendszerek

A jelenség nem új keletű, már az 1950-es években is jelentek meg cikkek a témában. Azonban a legtöbb cikk és tanulmány által leírt hatások és kísérletek a tervezőasztalon maradtak. [1]

Egy 2008-as Telegraph cikk említi meg, hogy egy feltaláló olyan berendezést készített, mely ultrahangos technológiával képes a bort öregíteni. [14]

Egy 2016-os tanulmány, cím szerint az Ultrasound technology for food fermentation applications, alaposan ír az ultrahang tejtermékek és borkészítés közben

való felhasználási lehetőségeiről. Szintén ez a tanulmány írja le, hogy ehhez a technológiához az alacsony frekvenciájú (20-50kHz) ultrahang használható. [13]

Egy 2013-as tanulmány, a Use of ultrasound in food preservation arról ír, hogy ultrahangot használva sterilizálná az ételeket, hogy hosszabb ideig őrizték meg minőségüket. Ez a tanulmány az ultrahang sejttromboló hatását mutatja be. [15]

Kiemelném JENG-JUNG SHYR és SIAO-HAN YANG 2015-ös tanulmányát, melyben ultrahang segítségével egy kávélikőr erjesztési idejét csökkentik számottevően. Kísérletükben a kávélikőr 6 órás intenzív besugárzás után olyan állapotba került, mint a 120 napig érlelt. Ezek alapján megállapítják, hogy az ultrahangos kezelés jó alternatívája a rizs-bor alapú likőrök öregítésének. [1]

Az ipari gyakorlatban a Hielscher jár elől bioetanol készítése közben való erjesztés gyorsítására alkalmas berendezésével a piacon. Ők leginkább nagy teljesítményű, ultrahangos homogenizáló berendezéseket gyártanak, azonban erjesztéstechnológiai tesztberendezéseket, és ipari besugárzókat is árulnak, ezekre példa az 1. ábrán látható. Gépeiket keverésre, és részecskeaprításra is lehet használni. [12]



1. ábra A Hielscher ultrahangos rendszere

2 Technológiai áttekintés

2.1 Mikrobiológiai áttekintés

2.1.1 Az erjesztés fogalma, felhasználása

Az erjesztést több célra használják:

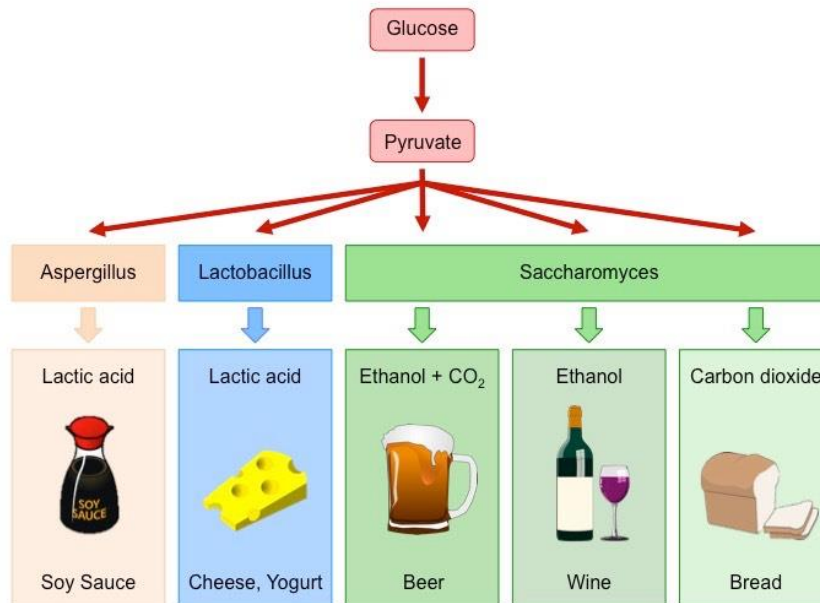
1. Szerves vegyületek előállítására, melyeket élelmiszer adalékokként, enzimekként, antibiotikumokként, motor hajtóanyagként használnak (bio üzemanyag).
2. Mikroba sejttömeg, vagy sejtkivonat előállítása céljából. Például takarmányélesztő, sütőélesztő.
3. Tejsavasan erjesztett élelmiszeripari termékek. Például joghurt, kefir, sajt, kenyér.
4. Alkoholosan erjesztett italok. Például sör, bor.

Jelen dolgozatnak nem célja a különféle erjesztési formákat alaposan átnézni, és rendszerezni, így az alapvető információkon túl az erjesztés folyamatát az alkoholos erjesztésen keresztül mutatom be.

Az alkoholos erjesztés alapegyenlete:



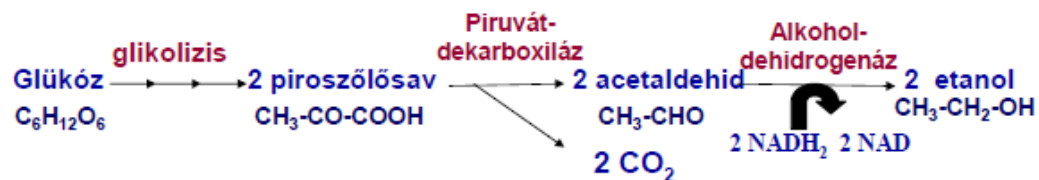
Ami azt jelenti, hogy glükózból, erjesztőgombák segítségével több, bonyolult lépésben alkohol, szén-dioxid és hő keletkezik. Alkoholos erjesztésre az élesztőgombák (pl. *Saccharomyces cerevisiae*), és ritkábban a fonalagombák (pl. *Mucor rouxii*) képesek. Az etanolos erjedés a citoplazmában megy végbe. [9]



2. ábra Az erjesztéssel készülő ételek fajtái

2.1.2 Az erjesztés folyamata

Az alkoholos erjesztés folyamán a glükóz először piroszőlósavvá alakul, majd szén-dioxiddá és acetaldehiddé. Az acetaldehid alakul át később etanollá. [9]



3. ábra A glükóz átalakulása erjedés közben

2.1.3 Szonoporáció

A 90-es évek közepétől számos tanulmányt publikáltak arról a jelenségről, hogy az ultrahang megnövelheti a tápanyag bevitelt élő sejtekben. Ebben benne foglaltatnak tanulmányok, melyek az alacsony molekulatömegű anyagok, természetes tápanyagok és peptidek, proteinek felvételéről szólnak. [10]

A szonoporáció szó azt az ideiglenes sejtmembrán megnyílást írja le, ami a sejt ultrahangos besugárzása után következik be. [10]

2.1.3.1 A szonoporáció hatása

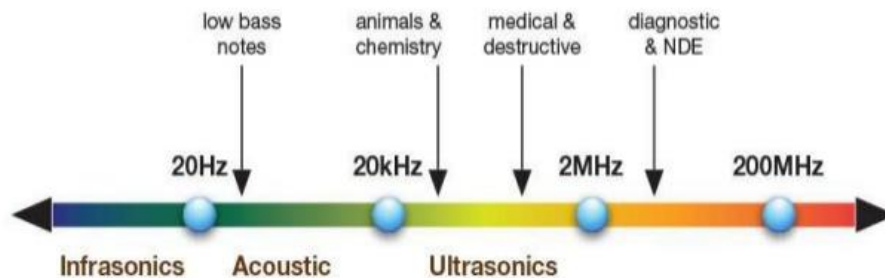
Az elektroporáció során elektromos áram segítségével a makromolekulák (fehérjék, DNS, RNS) sejtmembrán permeabilitása, tehát a sejtmembránon történő

átjutásuk fokozódik. Leginkább in vitro használják, azonban in vivo alkalmazására is ismert néhány példa (bőr, izom, agy). Ugyanakkor számolni kell azzal is, hogy maga az elektroporálás aktiválhatja a sejtek stressz-jelátviteli útvonalait, ezzel jelentős mellékhatásokat létrehozva. Megvalósítható alternatívát jelentene a szonoporáció (ultrahang segítségével történő bevitel, lásd lent), mely az elektroporációhoz hasonlóan nyitja meg a sejtek pórusait és fokozza az siRNS felvételét, azonban kevesebb mellékhatást vált ki. Az ultrahang ezen hatása tovább erősíthető az ultrahang kontrasztanyagok segítségével, melyek valójában gázzal töltött buborékok, melyek kidurranásukra gáz kilövellése során keletkezett erővel hozzák létre a terápiás molekula sejtbe történő bevitelét [2]. Összefoglalva: a szonoporáció egy megoldás a sejtmembrán átteresztőképességének megnövelésére, hogy egyébként egyben feldolgozhatatlan méretű alkotórészeket vigyünk be.

2.2 Fizikai áttekintés

2.2.1 Az ultrahang helye a hangok között

A hang egy longitudinális nyomáshullám, mely levegőben 330m/s sebességgel terjed. Az emberek által hallható hang frekvenciája 20Hz-nél kezdődik, felső határa 20kHz. Az ultrahang az emberek által hallható hangtartomány felett helyezkedik el, jellemzően 20kHz-től, frekvenciája akár több MHz is lehet. A 20 Hz-nél alacsonyabb frekvenciájú hangokat infrahangoknak nevezzük.



4. ábra A hangok spektruma

A fenti ábrán jól látszik, hogy a hallható hangok csak egy kis részét teszik ki a hang spektrumnak. Az is látszik, hogy az ultrahangok által lefedett spektrum jóval nagyobb, mint a hallható hangok tartománya. Az alig a hallható hangok tartománya fölött levő ultrahangot használnak kémiai folyamatokban például keverésre, és ilyen frekvenciasávban vannak az állatvilágban ultrahangot használó állatok hangjai is (pl. denevér).

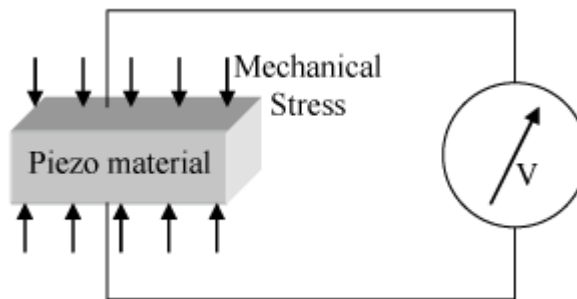
2.2.2 Előállítás

Az ultrahangok előállítása jellemzően piezoelektromosság, vagy a magnetostrikció jelenségével lehetséges.

2.2.2.1 Piezoelektromosság

A piezoelektromosság olyan elektromos jelenség, melynek során, bizonyos anyagokon összenyomás hatására elektromos töltés keletkezik. Ha piezoelektromos

tulajdonságú anyag felületére váltakozó feszültséget vezetünk, akkor mechanikai rezgésbe jön. Ezt negatív piezoelektromos hatásnak nevezzük. Ellenkező esetben pozitív piezoelektromos hatásnak nevezzük azt, amikor a piezoelektromos tulajdonságú anyag a felületét ért mechanikai hatásra elektromos feszültséget ad válaszul. A geometriájuk alapján a teljes ultrahang tartomány lefedhető ezzel. A jelenség fizikai magyarázata: például kvarcban a Si és O atomok egy szabályos hatszög csúcsán helyezkednek el. Ha a rendszert összenyomjuk, akkor a sarkokon elhelyezkedő Si és O atomok közelebb kerülnek egymáshoz, az előbbi helyen az O-atomok negatív töltése, az utóbbi helyen a Si atomok pozitív töltése jelentkezik. A hőmérséklet növekedésével a piezoelektromos tulajdonság csökken, majd a Curie –ponton depolarizálódik. [4]



5. ábra A piezoelektromos hatás illusztrálása

Jelen dolgozatban ezt a megoldást alkalmazzuk ultrahang keltetésére.

2.2.2.2 Magnetostrikció

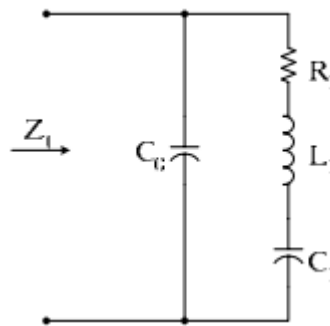
A magnetostrikció vagy Joule-effektus a ferromágneses anyagok mágneses igénybevétel hatására történő rugalmas alakváltozása. A jelenséget Joule fedezte fel 1847-ben. Szintmérőkben és szinttávadókban terjedt el az 1970-es évektől, mivel akár 50 mikrométeres pontosság is elérhető vele. [16] Ebben az esetben mi nem ezt a megoldást alkalmazzuk.



6. ábra Egy modern Profibuson csatolt magnetostríciós útdő

2.2.3 A szőrőfej helyettesítő képe

A szakirodalom az ultrahangos transzducer helyettesítő képeként leginkább a Butterworth – Van Dyke ekvivalenst használja. [7]



7. ábra Az ultrahangos transzducer helyettesítő képe

Jelölések:

Z_L: Eredő impedancia

C₀: Statikus kapacitás

C₁: Ekvivalens kapacitás

L₁: Ekvivalens induktivitás

R₁: Az impedancia valós része a rezonáns frekvencián, mechanikai veszteség

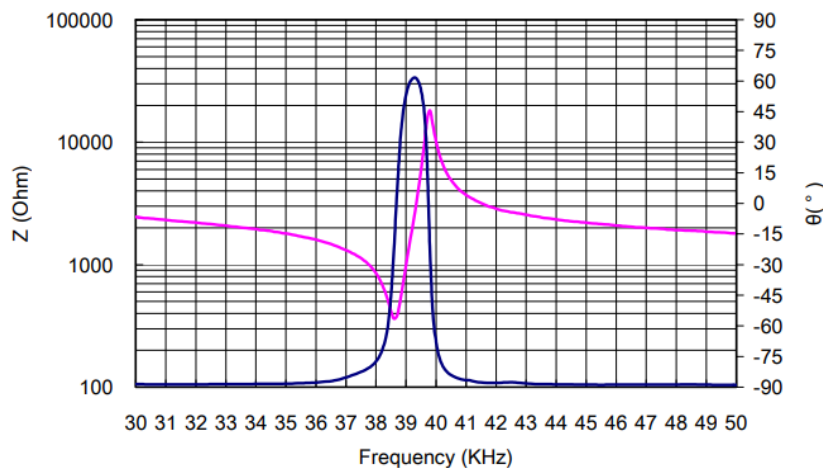
A helyettesítő kép impedanciája meghatározható:

$$Z_T = \frac{(L_1 C_1 \omega^2 - 1) - j(R_1 C_1 \omega)}{(R_1 C_0 C_1 \omega^2) + j[L_1 C_0 C_1 \omega^3 - \omega(C_0 + C_1)]}$$

Ezek alapján meghatározható az áramkör soros és párhuzamos rezonanciája. Számunkra a soros rezonancia értéke a fontos, azonban a gyakorlatban az ilyen módon számított értékek csak közelítések a valódi paraméterekhez képest, mivel a valós rezonáns és antirezonáns frekvenciák, és így az impedanciaértékek nem ismertek. [7]

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

Példaképp itt láthatunk egy valós mérést egy ultrahangos transzducerről (ProWawe, 400ER250) . Lila színnel van rajzolva az ábrán az impedancia valós része, és kék színnel a szög. $(Z \angle \theta)$ Látható, hogy a soros rezonancia frekvencián (38.6 kHz) az impedancia valós része a minimumán van, míg a párhuzamos rezonancián (antirezonancia) az impedancia valós része eléri maximumát (39.8 kHz). [8]



8. ábra Egy szórófej rezonancia karakterisztikája

2.2.4 Az ultrahang felhasználása

Az ultrahangot széles körben alkalmazzák különféle feladatokra. Néhány jelentősebb felhasználás ezek közül:

- Orvosi ultrahang: A visszaverődő hangból leképezhetők az izmok, lágy szövetek, csontok felszíne.
- Ultrahangos tisztító kádak: Ezek a kádak gyakorlatilag „lerázzák” a szennyeződéseket a tisztítandó anyagról.
- Ultrahangos hegesztés: Az ultrahang hőhatását használja fel az anyag megolvasztására, és az oldhatatlan kötés megteremtésére.

- Ultrahangos sejtroncsolás: Ultrahangos sterilizálás és antibakteriális környezet kialakítása.
- Ultrahangos távolságmérés: Ipari tárolókban, üstökben, de gyakorlatilag bárhol alkalmazható kontaktusmentes távolságmérés, mely a hang ismert terjedési idején, és ennek mérésén alapszik.

2.2.5 Az ultrahang mérése

2.2.5.1 Szabad levegőn

Az ultrahang mérése szabad levegőn egyszerű mikrofonokkal történhet. Fontos figyelni arra, hogy a mikrofonok jellemző karakterisztikája az ember által hallható hangtartományban van, így az ultrahangok méréséhez olyan, megfelelő mikrofont kell választani, amely megfelelően működik a hallható hang tartománya felett.

2.2.5.2 Folyadékban

Folyadékban való mérés esetén egy különleges, víz alatti akusztikai mérésekre alkalmas eszközt, úgynevezett hidrofont szokás alkalmazni. Ez egy speciális, vízálló burkolattal ellátott mikrofon. Rendszeresen piezo rendszerű hangszedőt alkalmaznak arra a célra, hogy a víz alatti élővilág, és egyéb víz alatti eszközök által keltett nyomáshullámokat felvegyék.

A múlt században, az I. világháborúban hidrofonokat használtak arra a célra, hogy a német tengeralattjárókat detektálják. Manapság is elterjedt, főleg szeizmológusok és a tengert kutatók körében. Bár a hidrofon használható levegőben is, kifejezetten a vízzel való érintkezésre van hangolva az akusztikus impedanciájuk.



9. ábra Hidrofon

2.2.6 Az ultrahang biológiai hatásai

Moser és Pálmai szerint az ultrahang biológiai hatása lehet életfunkciókat serkentő, és gátló, illetve sejtek, szövetek irreverzibilis károsodását okozó. (1992) [4]

A „Use of ultrasound in food preservation” című tanulmány arról ír, hogy miként lehet az ételek eltarthatóságára nézve káros mikroorganizmusokat ultrahangos besugárzással megsemmisíteni. [15]

2.2.7 Akusztikai impedancia

2.2.7.1 Az akusztikai impedancia definíciója

A hang terjedési irányára merőlegesen fekvő felületre ható hangnyomás p és a részecskesebesség u komplex hányadosa. Valós része az akusztikai ellenállás, amelynek egysége az akusztikai ohm. Az akusztikai impedancia reciprok értékét akusztikai admittanciának nevezik.

Így $Z=p/u$, ahol Z értéke a frekvencia függvényében változik. Z értéke egy adott frekvencián megmondja, hogy egy adott légmozgás hatására mekkora hangnyomás generálódott.

2.2.7.2 Az akusztikai impedancia illesztése

Az akusztikai impedancia illesztése analógiát mutat az elektromos távvezetékek impedancia illesztésének technikájával. Illesztés nélkül a kisugárzott energia jelentős része visszaverődik, illetve elnyelődik. Ezért tervezik a hullámvezetőket például 50 ohmos impedanciára. Az akusztikában is hasonlóan működik a jelenség. Az orvosi ultrahangban használt gél szerepe az, hogy illessze a szórófej akusztikus impedanciáját a testhez. Enélkül az ultrahang nagy része visszaverődne a testről.

2.2.8 Jelfeldolgozási megfontolások

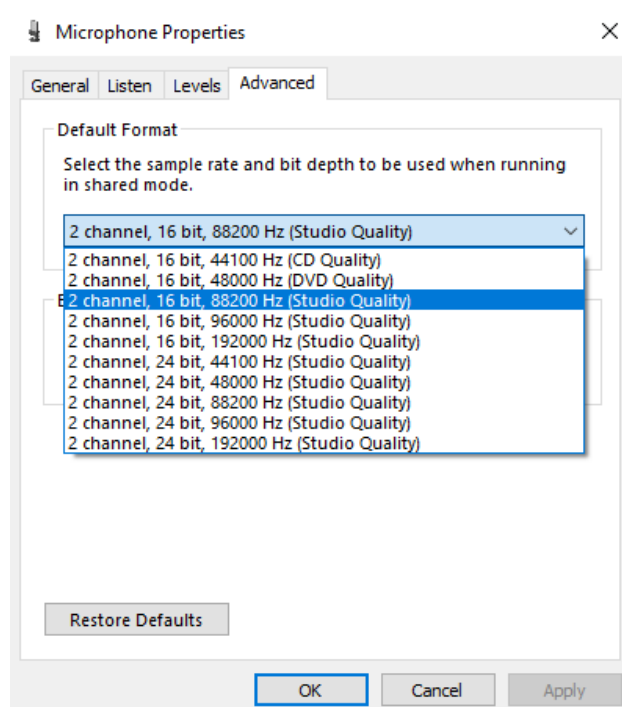
Tekintettel arra, hogy az ultrahang egy analóg, folytonos jel, számítógépes feldolgozásához szükséges az, hogy megfelelően képezzük le, és dolgozzuk fel.

Ahhoz, hogy az analóg jeleket digitális eszközökkel feldolgozhassuk, először véges bitszámon ábrázolt számsorozatokká kell alakítani őket. Ez időben és amplitúdóban is diszkrét formára hozását jelenti a jelnek.

2.2.8.1 Mintavétel

Célunk az, hogy az időben folytonos jelből mintasorozatot készítsünk. Ennek leggyakoribb módja, hogy a mintasorozat a jel egyetlen időben vett értékeit tartalmazza. Ehhez figyelembe kell vennünk a Shannon-Nyquist tételt.

Ez az oka annak, hogy az ultrahangos méréseink során nem elegendő a számítógépben alapbeállításként alkalmazott, és széles körben, leginkább az audioteknikában elterjedt 44100Hz-es mintavételi frekvencia, hiszen ebben az esetben a legnagyobb visszaállítható frekvenciájú hang a 22050Hz, amely kisebb, mint az általunk mérni kívánt jel frekvenciája. A mintavételi frekvenciát ezért 88200Hz-re állítottam, hiszen a 44100Hz frekvenciájú felső határ elegendő számunkra a méréseknél.



10. ábra A PC hangkártyáján beállítható mintavételi frekvenciák

Látható, hogy a számítógép hangkártyája több mintavételi frekvenciát, és különféle kvantálási szinteket támogat. Ezt különösen fontos átállítani, hiszen

önmagában a mérőszoftver mintavételi frekvenciáját átállítva, a fizikai hardver még az alacsonyabb mintavételi frekvencián mér

3 A rendszerterv

3.1 Áttekintés a kiírás tükrében

Vegyük itt végig a kiírást, és nézzük végig a megvalósítandó feladatokra vonatkozó részeket.

Jelen fejezetben elkészítem a rendszertervet ipari környezet figyelembevételével. Ennek specifikációja a 3.2 pontban kerül részletezésre. Ezek után megtervezem az ultrahangos besugárzó eszközök prototípusát, sorozatgyártási szempontok figyelembevételével. A prototípus jelentése mintadarab, első példány. Éppen ezért a prototípus megépítésénél az alábbi szempontok lebegtek a szemem előtt:

- A prototípus rendelkezzen a tervezett eszköz fő funkcionalitásával
- A prototípus legyen minél modulárisabb, illetve minél több mérési ponttal rendelkezzen
- A prototípus minél több, tervezett végső funkcióval rendelkezzen
- A prototípus legyen minél gyorsabban legyártható
- Sorozatgyártási szempontok: ne legyenek benne irreálisan drága, vagy nem reprodukálható alkatrészek.

Mindezek után kidolgozom a tervet az ipari védelemre. A következő fejezetek foglalkoznak a rendszer építésével és bemérésével. Részletesen dokumentáltam a tervezés, beültetés, élesztés folyamatát. A már működő rendszer igazolására megmértem egy szórófej iránykarakterisztikáját több közegben. A rendszerterv, a megépítés és mérés az alábbiakban olvasható.

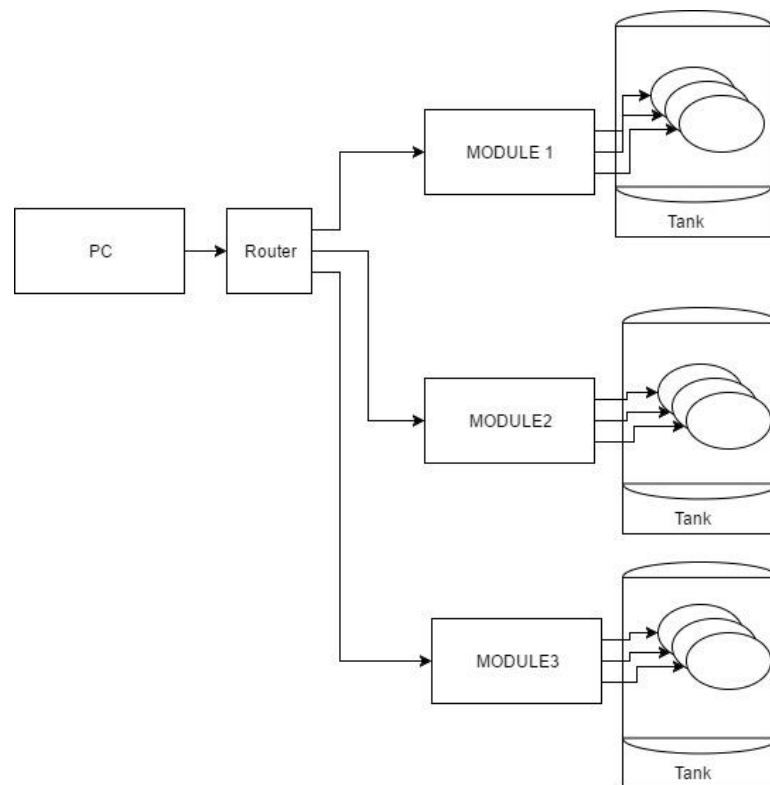
3.2 Rendszerterv

A rendszer modelljének megalkotásához szükség van a pontos specifikáció elkészítésére. Ennek ki kell térnie az összes fontos részre, amely a rendszertervben megtalálható.

A rendszer főbb alkotórészei:

- Meghajtó modul, Ethernet csatlakozással
- PC oldali szoftver

Ezen rendszernek a felépítése a 11. ábrán látható:

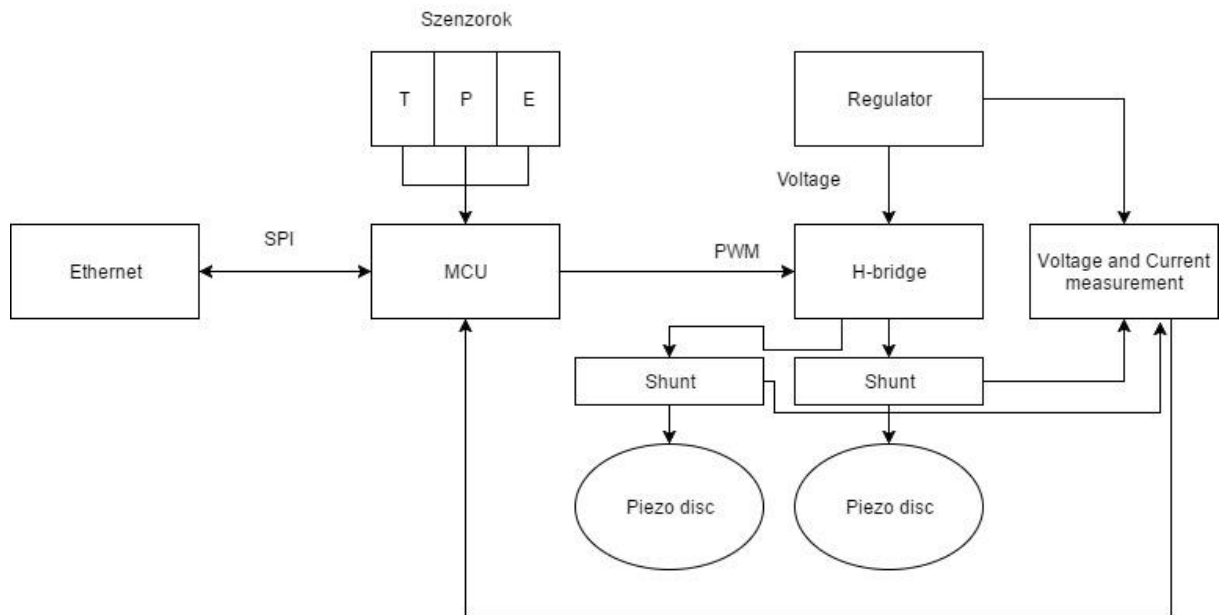


11. ábra A rendszer vázlata

A meghajtók felé irányuló specifikációs elvárás a következő volt:

- Legyen rajta Ethernet csatlakozó, legyen képes azon keresztül kommunikálni
- Legyen rajta ultrahang meghajtására képes tápegység, melynek paraméterei
 - Ennek a kimeneti teljesítménye legyen állítható (feszültség)
 - Kimeneti frekvenciája legyen állítható

- Legyen képes több szórófejet meghajtani
- Mérje a kiadott teljesítményt (feszültséget és áramot)
- Belső állapotát jelezze megfelelő LEDeken
- Mérje a hőmérsékletet
- A későbbiekben további szenzorok csatlakoztatási lehetősége legyen megvizsgálva



12. ábra A meghajtó modul felépítése

3.3 Alkatrész választás

3.3.1 Processzor választás

3.3.1.1 PIC18F97J60 típusú megoldás

A PIC18F97J60 mikrokontroller tartalmaz egy Ethernet meghajtót fizika interfésszel. Ez a tervezési munkákat és az alkatrészszámot is jelentősen csökkenti

- Pro: saját megoldás, saját tervek, kevesebb alkatrész
- Contra: több tervezés

3.3.1.2 Beaglebone/Raspberry Pi/ Arduino TIAN

Az egylapos (SBC) számítógépek nagy népszerűségnek örvendenek a szakmabeliek között, azonban itt számunkra kevésbé jó választás. Ugyan igazán egyszerűen lehet vele tervezni, mert Linuxra fejleszthetünk, és nyomtatott áramkörü lemez tervezése esetén nem kell a processzorral és az Ethernet illesztőhálózattal foglalkoznunk, sorozatgyártás esetén komoly összegeket emészt fel. Míg a 3.3.1.1 – pontban említett processzor ára 6 USD körül van, addig egy ilyen SBC ára 30-40\$ között kezdődik, és támogatottságuk is igen változékony. A Raspberry Pi például rendkívül jól dokumentált, míg a kínai társairól ez egyáltalán nem mondható el.

- Pro: gyors, egyszerű, kevesebb tervezés
- Contra: nem ipari megoldás, drága, nem helytakarékos, csak prototípushoz jó

3.3.1.3 Microchip ENC28J60 + processzor

A harmadik megoldásnak a Microchip ENC28J60 Ethernet modemét találtam. Ez egy külső ethernet chip, mellyel SPI interfészen keresztül kommunikálunk. Ennek előnye, hogy igen jól dokumentált, azonban a plusz alkatrészek többletköltséget okoznak, és helyigényes is.

- Pro: saját megoldás
- Contra: Processzor is kell, drágább, nehezebb tervezni, több hely

3.3.1.4 Arduino Uno + Ethernet shield

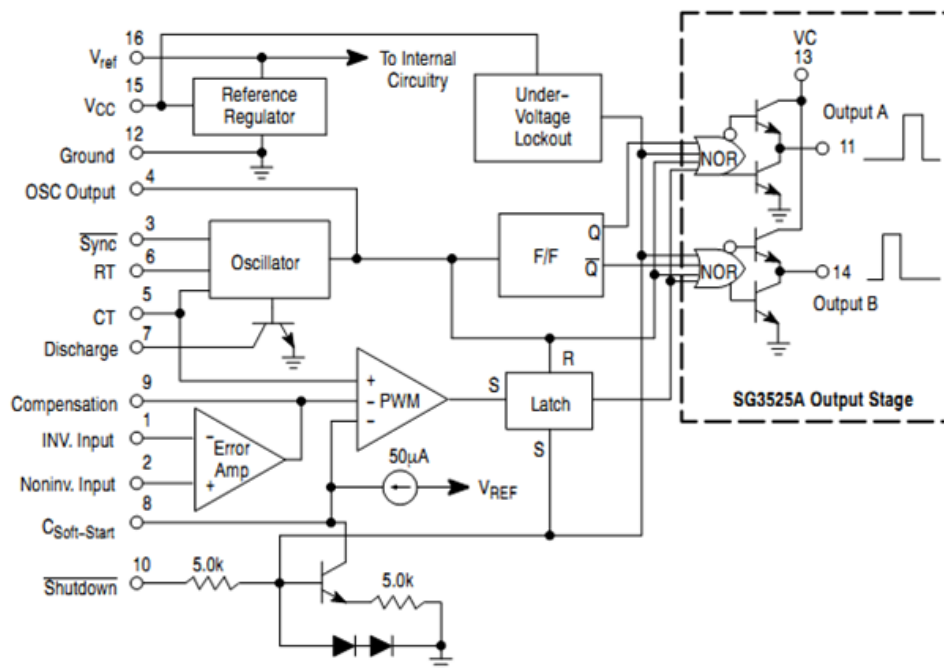
Az Arduino rendszer a XXI. század elektromos legója. Sok processzor támogatja a nyílt forráskódú fejlesztőrendszert, melyet úgy készítettek el, hogy egyszerűen kezelhető legyen. Számptalan alkatrész és fedlap kapható hozzá, így hardver validáláshoz ideális, mert meggyorsítja a fejlesztést.

Míg a végső ipari megvalósításra mindenféleképpen saját tervezésű áramkör szükséges, addig a rendszer validálásához, és prototípusának megépítéséhez elegendő egy olcsó, széles körben elterjedt processzor, melyhez könnyen interfészeltető Ethernet fedlap kapható. Ezzel, -bár az Arduino Uno kilóg a korábbi felsorolások sorából – a prototípus megépítéséhez ezt fogom választani.

3.3.2 A PWM IC

A ultrahangos transzducer meghajtására nem elegendő a processzorba integrált PWM modul, annál pontosabban kell jelet generálnunk. Erre a célra az ST Microelectronics SG3525 nevű PWM generáló IC-je kiváló. Széles frekvencia spektrumban (120Hz – 400kHz) állítható kimenete, és sok hangolható paramétere van. A blokkdiagramja itt látható.

SG3525 Block Diagram



13. ábra A PWM IC blokkvázlata

Az ábrán látható, hogy az IC rendelkezik saját oszcillátorral, lekapcsoló áramkörrel, és alacsony feszültség esetén nem engedi a kimenetet érvényre jutni. Egy hibaerősítőn keresztül lehet állítani a kitöltési tényezőt, melyhez saját referencia feszültséget állít elő.

Az IC-nek két kimenete van, melyek egymáshoz képest ellenkező fázisban vannak. Ez pontosan azért lett így tervezve, hogy képes legyen meghajtani teljes H-hidakat. A két kimenet közé a rendszer holtidőt iktat.

A frekvencia beállítása az alábbi képlet használható:

$$\frac{1}{Ct(0.7Rt + 3Rd)}$$

Ebből kiszámolható, hogy nagyjából 3kOhm ellenálláshoz 40Khz feletti érték tartozik, és 18kHz-hez 8kohm, így elég ezt az ellenállás tartományt biztosítani.

3.3.3 Ultrahang transzducer

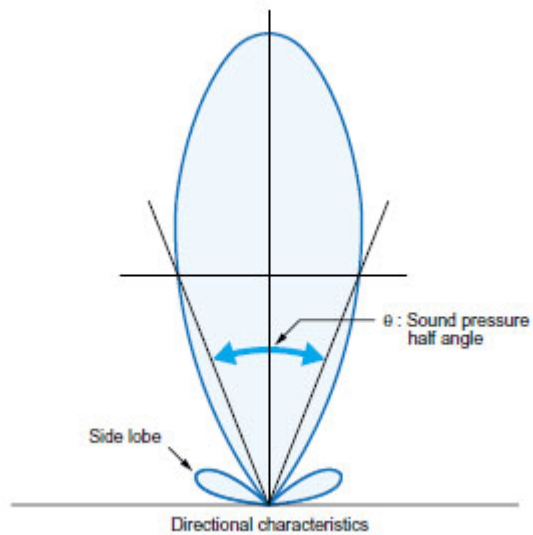
Ultrahang keltésére piezoelektromos transzducert használ az ipar. Ezek a piezoelektromos kristályok azon tulajdonságát használják ki, hogy elektromos áram hatására megváltoztatják térfogatukat. A piacon több féle szórófej, vagy transzducer is elérhető. Kedvező árúak az 50mm átmérőjű kerámia korongok, melyek 30W elektromos teljesítmény felvételére is alkalmasak, rezonáns frekvenciájuk a 40kHz környékén található. Ennél komolyabb méretű szórófejek rendszerint a 20-25 kHz rezonáns frekvenciájú tartományban kaphatóak, rendszerint 50-100W elektromos teljesítménnyel. Ezek már rendszerint irányított szórófejek, akusztikailag illesztett lezáró elemekkel.

Az élő sejtek szempontjából a frekvencia nem elhanyagolható. Kísérletek bizonyították, hogy az ugyanolyan teljesítményű, de alacsonyabb frekvenciájú ultrahanggal kezelt minták viabilitása rosszabb volt, mint a magasabb frekvencián kezelték.



14. ábra Egy ultrahangos transzducer

A szabadon rezgő piezoelektromos lapkát un. gombába zárják. Azaz alulról és felülről is megfelelő fémekkel regulázzák meg, így az ultrahang irányítottá válik.



15. ábra Iránykarakterisztika

Egy ilyen transzducer fontosabb paramétere a rezonancia frekvencia, ahol a kimenetén a legnagyobb teljesítmény jelenik meg. Ehhez a frekvenciához tartozó un. rezonáns

ellenállás is fontos jellemző. Mivel a transzducerek kapacitív elemek, így a kapacitásukat is meg szokás adni, ami tipikusan $\sim 4000\text{pF}$ körül mozog.

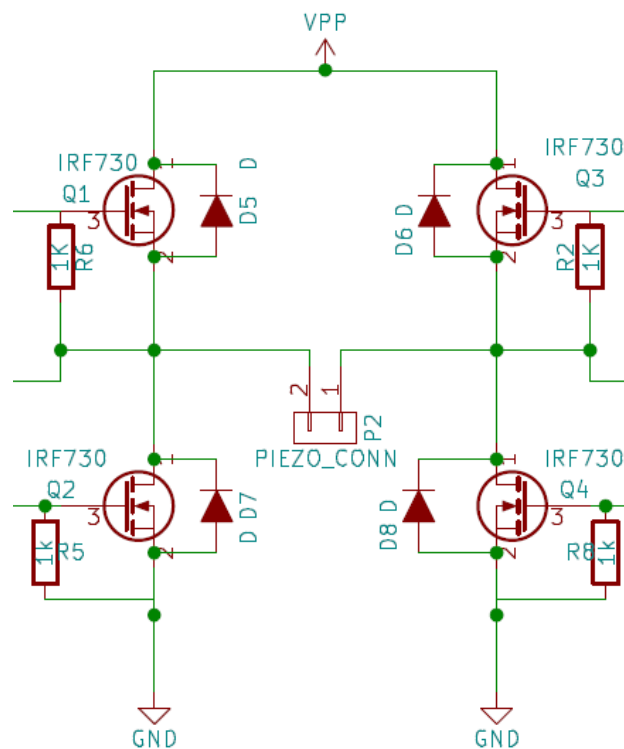
Én a kísérletekhez egy 25kHz rezonáns frekvenciájú, ultrahangos tisztítógépekhez gyártott 50W elektromos teljesítmény felvételére képes szórófejet használok.

3.3.4 Ultrahang generálása

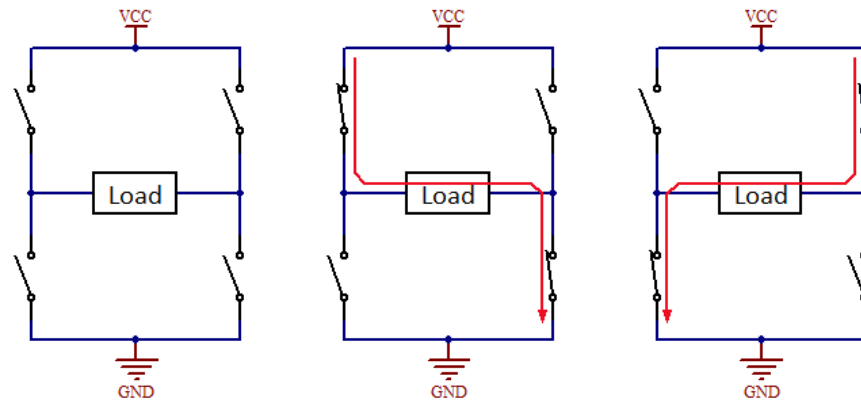
Az ultrahangos szórófej meghajtására több lehetőség is rendelkezésünkre áll. Ezen megoldásokat ismertetem itt.

3.3.4.1 Hídkapcsolással való meghajtás

A szórófejet legegyszerűbben úgy tudjuk meghajtani, ha egy hídkapcsolást használunk. Ez lehet félhíd, vagy teljes híd. A teljes híd kapcsolás előnyösebb olyan szempontból, hogy a meghajtani kíván eszközt kétszer akkora feszültségváltozásnak tehetjük ki. Ennek egy megoldását láthatjuk a 16. ábrán.



16. ábra A H hídas meghajtás kapcsolási rajzának részlete



17. ábra A H-híd működési elve

Látható, hogy az híd két kapcsolójának zárása esetén áram folyik a terhelésen, -mely a mi esetünkben a transzducer lesz. A kapcsolók ellentétes irányba kapcsolásával megfordíthatjuk az áram irányát, ami ellentétes irányú feszültséghez is vezet. Ezt használjuk ki arra, hogy viszonylag kevés alkatrésszel nagy feszültségváltozást érhessünk el.

3.3.4.2 Transzformátorral való meghajtás

A másik megoldás a nagyfeszültségű transzformátorral való meghajtás. Ebben az esetben a meghajtó jelet egy transzformátorral nagyfeszültségre transzformáljuk. A transzformátor szerepe ebben az elrendezésben azért fontos, mert a feszültség kikapcsolásakor nagy feszültség alkalmazásakor nagy áram tüskék jelenhetnek meg, melyek a berendezések tönkretételéhez vezethetnek.

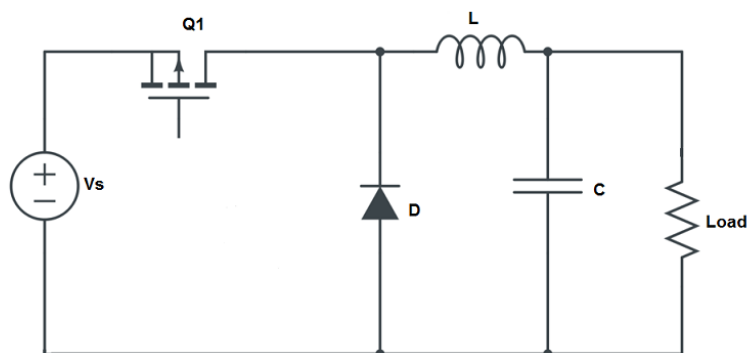
3.3.5 Kapcsolóüzemű tápegység

Az ultrahangos szórófejek meghajtásához szükséges feszültséget is elő kell állítanunk valahol. Ez jellemzően nagyobb feszültség, bizonyos rendszerekben akár az 1 kV-ot is elérheti. Jelen alkalmazásban 25-80V-ra lesz szükségünk. Ezt a feszültségtartományt előállíthatjuk a hálózati feszültség szaggatásával (step -down) vagy feltranszformálásával (step -up) is. Az első esetben Buck konvertert használunk, a második esetben valamiféle közbülső váltakozóáramú körös tápegységet.

3.3.5.1 Buck konverter

A Buck konverter egy rendkívül egyszerű tápegység topológia. Mindössze néhány alkatrészből áll. Bemenete egyenfeszültség, melyet egy K kapcsoló (tipikusan MOSFET vagy IGBT) megszagat. Ha a kapcsoló nyitva van, az áramkör a tekercsen keresztül záródik, és az abban tárolt energiát használja. Amennyiben zárva van, úgy feltölti a tekercset.

Szinkron változatát kisfeszültségű tápegységek készítésénél alkalmazzák.



18. ábra A Buck kapcsolás sematikus ábrája

3.3.5.2 Közbülső váltakozóáramú körös tápegység

Ezeknél a tápegységeknél tipikusan egy négyszögjelet állítanak elő, melyet egy nagyfeszültségű transzformátor segítségével feltranszformálnak a kívánt feszültségszintre. Ezek után a transzformátor kimenetén egy aktív kétutas egyenirányítóval egyenirányítják, és szűrik. A feszültség a kitöltési tényezővel arányosan állítható.

3.3.6 Szenzorok

A rendszert különféle szenzorok fogadására kell felkészíteni.

3.3.6.1 Hőmérőszenzor

Az ultrahangos szórófejek mellé célszerű elhelyezni egy hőmérő szenzort is, mely aktív visszajelzést szolgáltat hőviszonyokról. Én a DS18B20 típusú hőmérőszenzort választottam alacsony ára, és 1-Wire buszos illesztése miatt.

3.3.6.2 Belső hőmérés

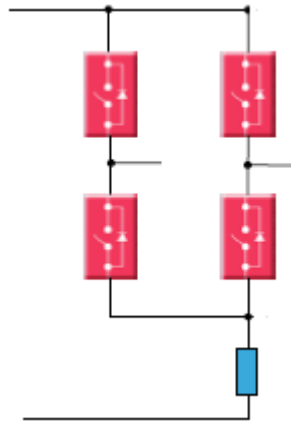
Mivel a berendezésben több tápegység is működik, így érdemes a biztonságos működés érdekében hőmérőket elhelyezni a kritikus pontokon, és a FET-ek felszínén, így időben észrevehető, ha hídági zárlat, vagy egyéb hiba történik.

3.3.6.3 Utólagos bővítés

A berendezés megtervezésekor ügyelni kell arra, hogy a későbbiekben további szenzorok is csatlakoztathatóak legyenek új áramkör tervezése nélkül. Ezért érdemes egy buszcsatlakozást (I2C) kivezetni csatlakozókra.

3.3.6.4 Árammérés

Az áram mérésére egy egyszerű sönt ellenállás elegendő, hiszen nagyon nagy áramok nem folynak az áramkörben. Amennyiben folynának nagy áramok, úgy kisebb sönt ellenállásra és egy erősítőkörrre lenne szükség.



19. ábra Az árammérés elve

3.3.7 Visszajelzés

A helyi visszajelzés fontos, ám csak tájékoztató jellegű, így itt csupán minimális információ átadása történik, LED -ek formájában. Tipikusan ez azt jelenti, hogy a bekapcsolt állapotot, a program futását és esetleg a hibát jelzi az eszköz.

3.4 Kommunikáció Etherneten

3.4.1 A TCP/IP protokoll

3.4.2 JSON

A JSON (Javascript Object Notation) egy magasszintű adatsere-formátum. Az embereknek könnyű olvashatóságot biztosít, és a gépek is könnyen dolgozzák fel és generálják. A JavaScript Programming Language, Standard ECMA-262 3rd Edition - December 1999 egy részhalmaza alapján készült. Teljesen nyelvfüggetlen, de a C-család szintaktikájához hasonló konvenciók fedezhetőek fel benne. [6]

Két fő részből épül fel:

- Egy név-érték párokból álló válogatásból
- Egy értékekből álló rendezett listából

```
{
  "empid": "SJ011MS",
  "personal": {
    "name": "Smith Jones",
    "gender": "Male",
    "age": 28,
    "address": {
      "streetaddress": "7 24th Street",
      "city": "New York",
      "state": "NY",
      "postalcode": "10038"
    }
  },
  "profile": {
    "designation": "Deputy General",
    "department": "Finance"
  }
}
```

www.kodingmadesimple.com

20. ábra Egyszerű JSON struktúra

3.4.3 Kommunikációs struktúra

A kommunikáció egy egyszerű TCP/IP protokollon való üzenetküldésből áll. A számítógépen fut egy kliens, ami rendszeres időnként csatlakozik az eszközön futó beágyazott webserverre, lekérdezi a legfontosabb adatokat, és elküldi az új státuszt, azaz működjön-e, vagy nem.

A PC kliensként viselkedve, küld egy TCP/IP üzenetet a szervernek, aki válaszul saját állapotát küldi el. Ehhez a kommunikációhoz tervezett struktúra az alábbiakban kerül részletezésre.

3.4.3.1 A kliens üzenete

A kliens dolga, hogy az ultrahang generálást elindítsa, vagy megállítsa. Néha azonban csak információra van szüksége. Ezeken kívül viszont nincsen szükségünk más üzenetre, így a kliens üzenete háromféle lehet.

- RUN – induljon el az ultrahang generálás
- STOP – álljon meg az ultrahang generálás
- ASK – nincs utasítás, csupán az aktuális helyzetet küldje el

3.4.3.2 A szerver válasza

A szerver, miután megkapta az üzenetet, és meggyőződött a helyes voltáról, az alábbi választ adja:

```

1 {
2   "Message": {
3     "Header": [
4       {
5         "id": "0001",
6         "Checksum": "0x123ABC"
7       }
8     ],
9     "Body": [
10      {
11        "Status": "RUN/STOP",
12        "Frequency": "230012",
13        "Temperature": "22.3",
14        "Bus voltage": "1634",
15        "Current": "175"
16      }
17    ]
18  }
19 }

```

21. ábra A kommunikáció JSON struktúrában

Azaz a következő adatokat szolgáltatja:

- Status: megy –e épp az ultrahang generálás
- Frequency: milyen értékre van beállítva a frekvencia
- Temperature: milyen értéket mér a külső hőmérsékletszenzor
- Bus voltage: milyen feszültség található a buszon
- Current: milyen amplitudójú áramot mér

3.5 Ipari védelem

Az ipari védelem kialakítására a következő elvárásoknak kell megfelelni:

- A meghajtó elektronikát védő doboz fröccsenő víz, gőz és pára ellen védve legyen
- A csatlakozók robosztusak legyenek
- A szórófejek legyenek vízállóak (IP68- as szabványhoz hasonlóan)
 - Élelmiszeripari szilikonnal való tömítés
 - Elektromos szigetelés önthető gumival

4 Megvalósítás

4.1 Az elkészült prototípus leírása

A rendszer tervezése után a prototípus elkészítése következett. Fontos megjegyezni, hogy a prototípusnak éppen azért van létjogosultsága, mert rendelkezik a rendszer alapvető tulajdonságaival, azonban bizonyos dolgok majd később lesznek implementálva, vagy teljesen ki vannak hagyva. A prototípus a következő funkciókkal rendelkezik:

- Képes előállítani tetszőleges 18kHz -40kHz közé eső PWM jelet. Ez a frekvenciatartomány jelenleg bőven elegendő.
- Tartalmaz egy H-hidat és megfelelő kivezetést a transzducer felé. Itt az IRFZ44N típusú MOSFETeket használtam és az IR2104 FET meghajtót.
- Képes mérni a transzducer által felvett áramot. Egy 2.2Ω -os árammérő ellenállás segítségével maximum 2A-es áramot tud mérni. A biztonság kedvéért mellé van tervezve még egy ugyanilyen ellenállás, hogy az árammérő korlát kiterjeszhető legyen.
- Képes mérni a buszfeszültséget egy feszültségosztón keresztül. Ilyen módon a felvett teljesítmény számítható. Fontos kitérni rá, hogy a különböző frekvenciájú feszültség és áram miatt a teljesítmény számítása nem triviális, az azonos frekvenciakomponensekből számított teljesítmények összegéből tevődik össze.
- Képes működni a 13V – 35V feszültségtartományban. Saját tápegységet nem tartalmaz, azonban a logikai feszültségekhez és IC tápokhoz szükséges 5 és 12 Voltot előállítja a bemeneti feszültségből.
- A megfelelő vezérlőlábak használatával a PWM generálás leállítható, azaz a PWM IC és a gate meghajtók is külön kapcsolhatók.
- Tartalmaz 3 db visszajelzésre alkalmas LED-et
- Megfelelő kapcsolódási pontokat tartalmaz ahhoz, hogy egy Ethernet fedlap csatlakoztatásával, a szerverrel kommunikálhasson.

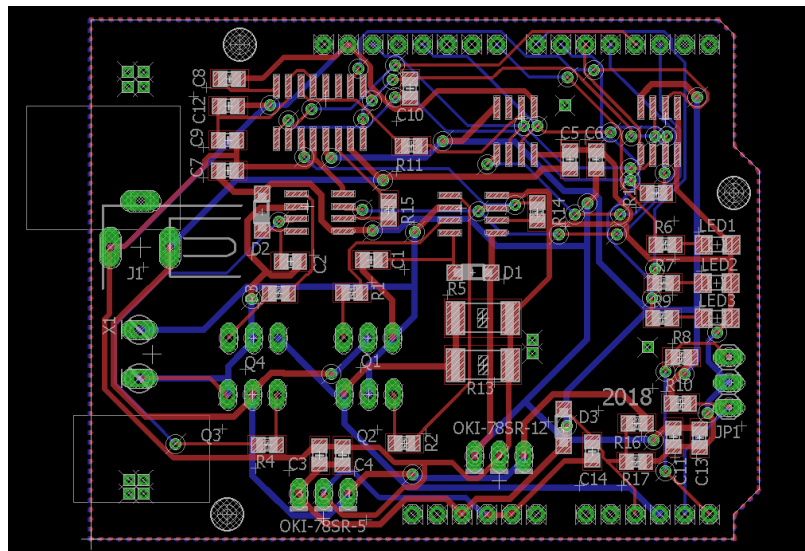
4.2 Tervezés

4.2.1 Elméleti tervezés

A prototípus elméleti tervezését a 4.1. pontban leírt megfontolások alapján készítettem a rendszertervből. Gyakorlatilag a rendszerterv kicsiben megvalósításáról van itt szó, mely a legfontosabb funkciókat tudja csak.

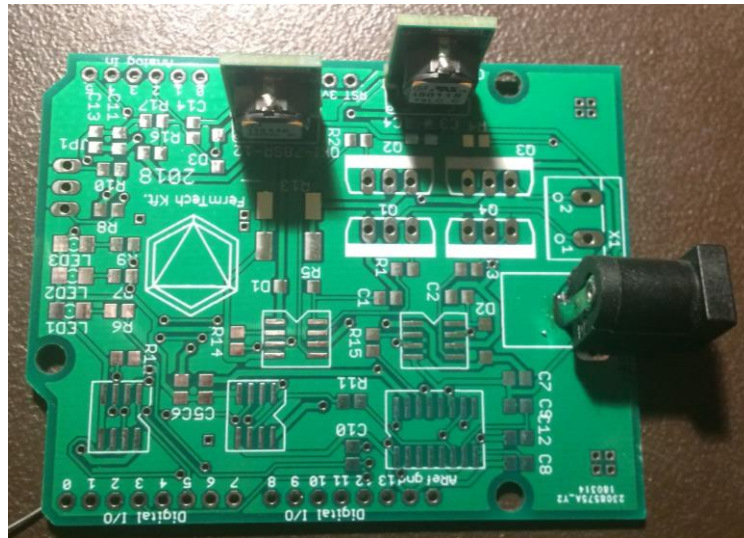
4.2.2 Hardvertervezés

A tervezés az EAGLE tervezőprogramban zajlott. A tervezés közben először megrajzoltam a kapcsolási rajzot, majd eközben a felhasznált egyedi alkatrészek lenyomatát (footprint) is. A függelékben megtalálható az áramkör kapcsolási rajza. A hardver tényleges tervezése (layout) akkor kezdődött, amikor a séma már készen volt. Egy egyszerű kétrétegű nyomtatott huzalozású FR4-es anyagú lemezt képzeltem el. A tervezés elkészültével gyártófájlokat (gerber) és fúrófájlt (drill) generáltam, amelyek segítségével bárhol legyárthatják az általam tervezett nyákot.



22. ábra Az elkészült nyomtatott áramköri lemez nézete a tervezőprogramban

4.3 Élesztés, bemérés



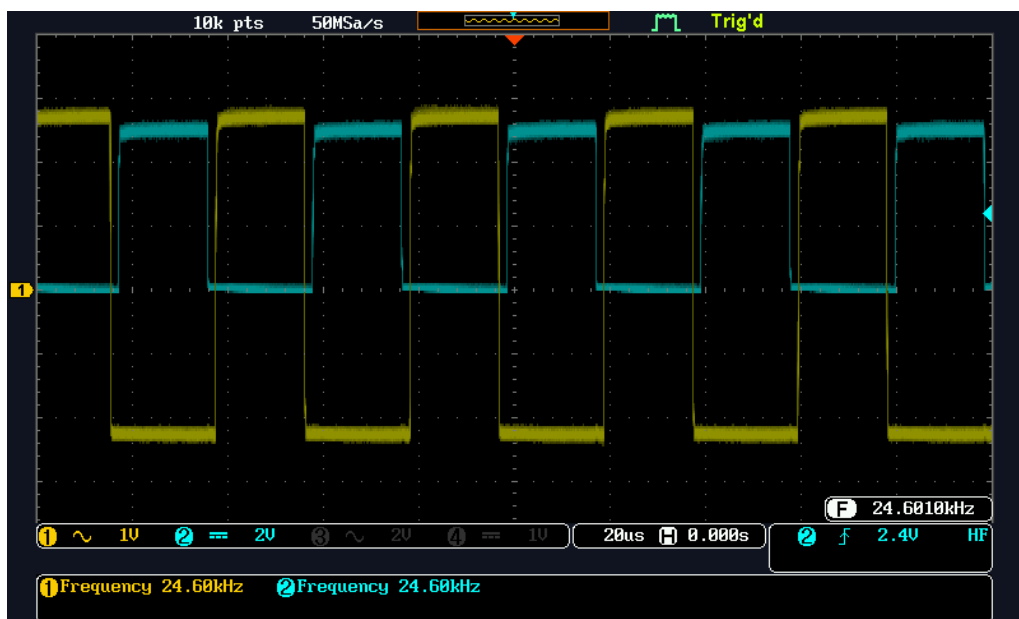
23. ábra A beültetés kezdete a tápáramkörrel kezdődik

Az áramkör beültetése a gyártással kezdődött. A nyákokat a *JLCPCB.com* oldal gyártotta Kínában, és postázta el. Az alkatrészek beültetése mindig a tápáramkörrel kell, hogy kezdődjön, hiszen ha bármi probléma van, itt kiderül. Ha az összes alkatrész a helyén van, kezdődhet az áramkör bemérése. Az alábbi ábrán látható, hogy a mosfet meghajtó áramkör egyik lába gyengébben lett beferrasztva, így nem működött rendesen. A periodikus jeleket előállító áramkörök bemérésénél rendkívül hasznos eszköz az oszcilloszkóp, főleg a modern, tárolós változat. Sok beültetési hibát lehet ezzel rendkívül gyorsan felmérni, így a beültetés közben történő meghibásodás esélye is alaposan csökken.

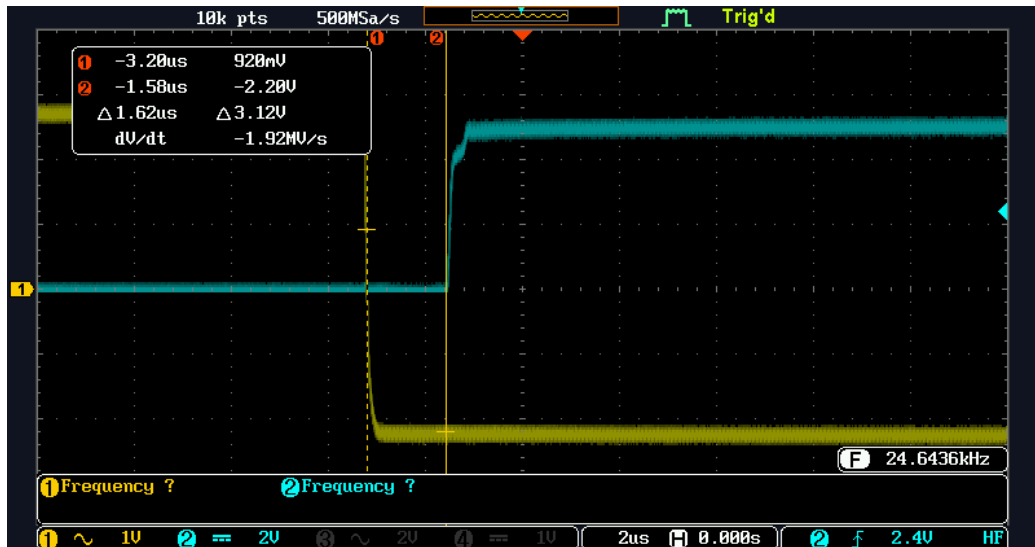
4.4 Első mérések

4.4.1 Az elektronika vizsgálata

A tökéletesen összerakott és beültetett nyák első mérései természetesen a PWM rendszerre irányultak. Ahogyan az ábrán is látható, a PWM, melyet az SG3525-ös IC generál, remekül megfelel arra a célra, hogy egy H-hidat hajtsunk meg vele. Tartalmaz beépített holtidő –kompenzációt, mely arra jó, hogy ne legyen hídági zárlat, azaz semmiképpen se nyisson össze egy alsó és egy felső kapcsolótranzisztor.

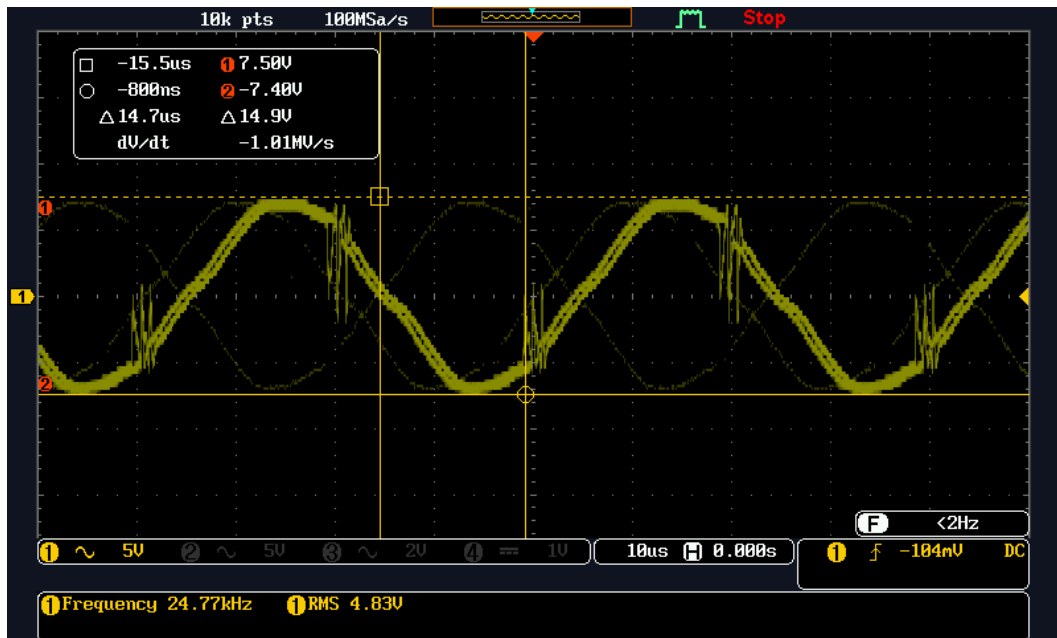


24. ábra A PWM IC jele



25. ábra A holtidő szemléltetése

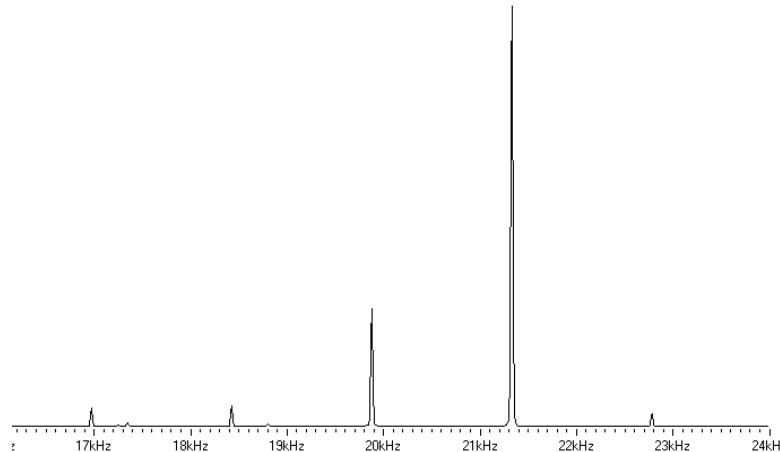
Látható, hogy a holtidő $1.62\mu\text{s}$, ami bőven elegendő nekünk arra, hogy ne nyissanak össze a kapcsolók. A 26. ábrán az áramot láthatjuk. Minél közelebb megyünk a gerjesztő frekvenciával a rezonáns ponthoz, annál inkább szinuszos jellegű a felvett áram.



26. ábra Az áram

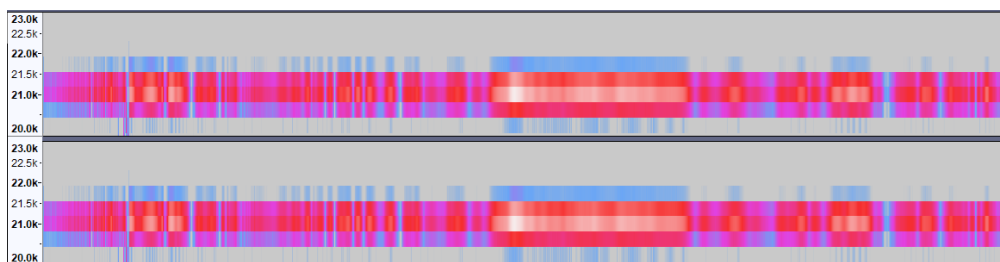
4.4.2 A szórófej vizsgálata

A validációs mérések komoly információt nem hordoznak, inkább csak arra szolgálnak, hogy eldöntsük, működik-e az eszköz, és ha igen, úgy működik –e, mint ahogyan elterveztük. Az alábbi spektrumképen például, remekül lehet látni, hogy a transzducer kibocsájt magából ultrahangot, méghozzá 21.4 kHz körül.



27. ábra Látható, hogy a szórófej ultrahangot bocsát ki

A következő mérésnek az volt a célja, hogy megállapítsuk előzetesen, érdemes – e karakterisztikát mérni ennél a transzducernél. Ehhez egy mikrofont a szabad levegőn, ismeretlen szögsebességgel elforgattam a működő szórófej körül 180 fokban, és a mikrofon jelét ez idő alatt felvettem az Audacity programmal. Ezt követően készítettem egy spektrogramot, melynek egyik tengelye a frekvencia, a másik az idő. A kép az alábbi ábrán látható.



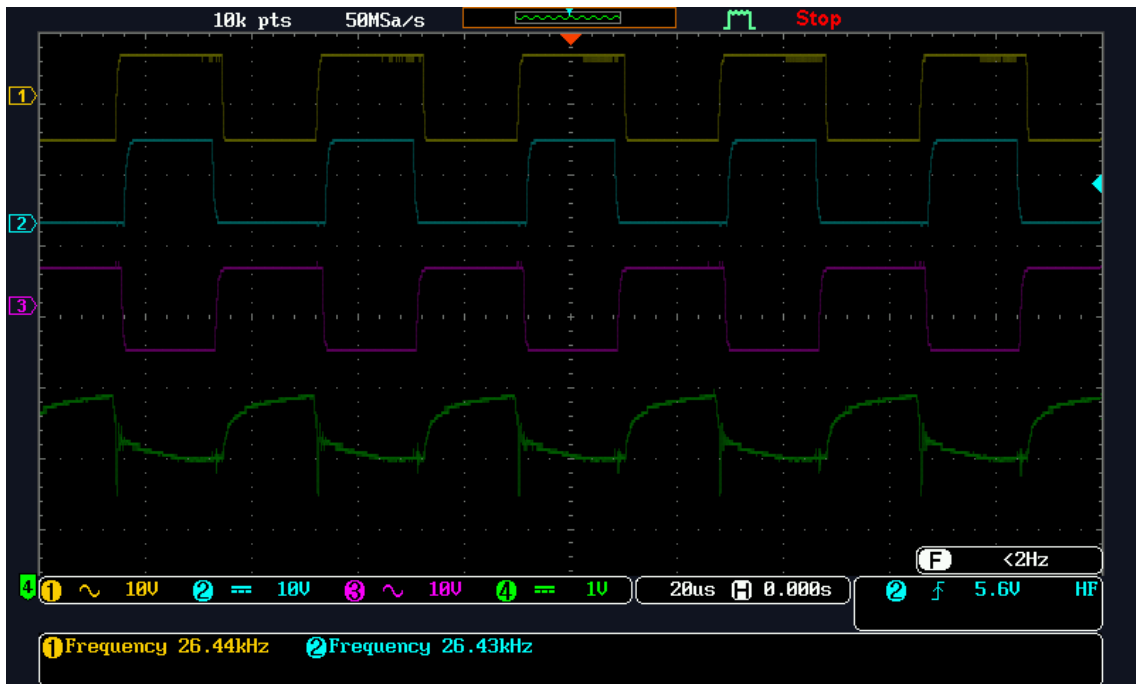
28. ábra Audiospektrogram

A spektrogramon jól látható, hogy a szórófejnek van egy bizonyos nyalábszélessége, és több, kisebb melléknyalábja is van. Ezzel tehát beigazolódott a feltevésünk, miszerint érdemes lenne karakterisztikát mérni ennél a szórófejnél.

4.5 Kihívások, problémák

4.5.1 Hibák a bemérés közben

A nyomtatott áramköri lapok beültetése közben fontos, hogy folyamatosan vizsgálva legyen az éppen beültetett részegység funkcionalitása, mert így zárható ki a többszörös hiba jelenléte. Példának okáért a 29.ábra esetében a beültetett MOSFET meghajtó IC egyik lába nem lett megfelelően beforrasztva, ennek megfelelően nem nyitotta ki a hozzá tartozó kapcsolót. Ebből is látható, hogy az oszcilloszkóp az áramkör felélesztéséhez elengedhetetlenül szükséges eszköz.



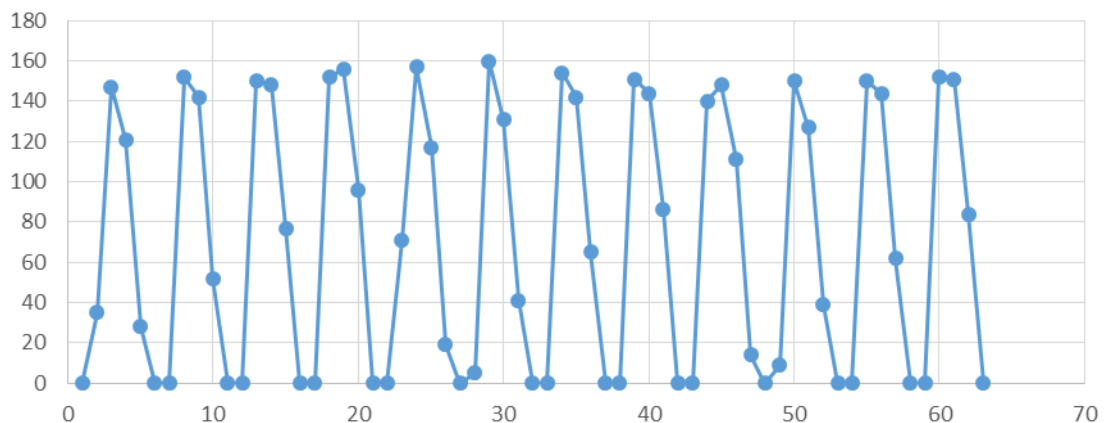
29. ábra Hibás MOSFET vezérlőjel

4.5.2 Árammérés tesztelése

Periodikus áram mérésénél fontos, hogy megfelelő mintavételi frekvenciával vegyük a mintákat az áramjelből. Sajnos az Arduino alapbeállítása 9600 Hz-volt, így ez nem volt elegendő a jel mintavételezésére. Szerencsére több megoldás létezik erre. Az ADC órajel 16MHz, ami egy előosztóval van leosztva. Ez alapbeállítás szerint 128,

amitől 125kHz-es lesz az órajele. Egy konverzió 13 ADC órajel ciklusig tart, amiből kijön a $125\text{kHz}/13 = 9600\text{Hz}$. Ha az előosztó értékét kellő mértékben csökkentjük, a mintavételi frekvenciát akár 150kHz környékére is felemelhetjük. Ez már megfelelő frekvencia egy 25kHz-es jelet mintavételezni. Az előosztó értékét 128 – ról 8-ra csökkentve 153.8 kHz-es ADC órajelet kapunk. Ezzel ugyan az ADC pontossága csökken, azonban a mintavételi frekvencia számunkra kedvező módon nő.

A 30. ábrán láthatunk egy, az Arduino által mintavételezett áramjelet. Látható, hogy ez a mintavételi frekvencia már elegendő információt szolgáltat számunkra.

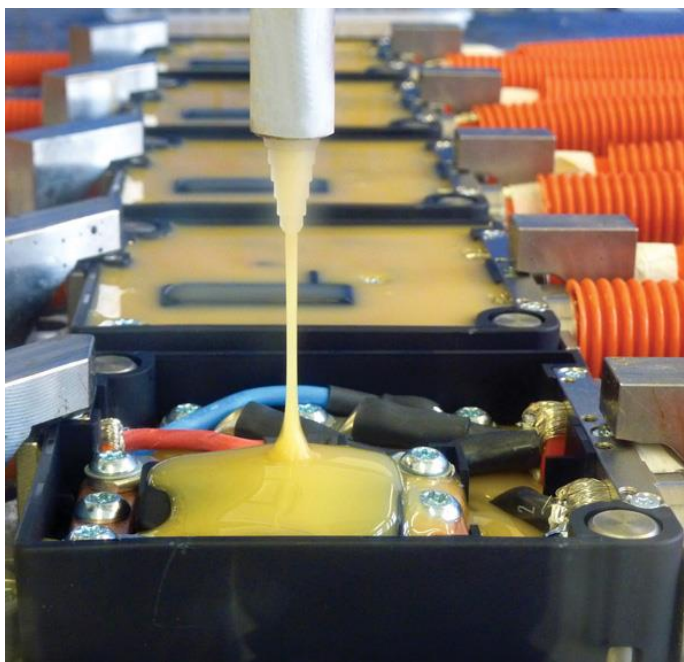


30. ábra Az árammérő által mért jel

4.6 Az ipari védelem megvalósítása

Ilyen környezetben az ipari védelem megvalósítása viszonylag egyszerű. Arra kell figyelni, hogy a felhasznált anyagok élelmiszeripari minősítést kapjanak.

A meghajtó elektronika védelme – tekintettel arra, hogy nagyfrekvenciás alkalmazásunkban nem folynak hatalmas áramok – kimerül abban, hogy az elektronikát kiöntjük valamilyen polimer alapú műgyantával. Ez véd a mechanikai sérülések ellen, és mindennemű fröccsenő elegy ellen is.



31. ábra Az áramkörök megvédésének módja az epoxival való kiöntés

A szórófejeket is hasonlóképpen kell megóvni, azonban itt óvatosabban kell eljárni. Első lépés az elektromos szigetelő gumival való szigetelés, majd második lépésként élelmiszeripari szilikonnal való bevonás következik. Ez azért fontos, mert így a szórófej élelmiszer előállítására alkalmas eszköz lesz.

A csatlakozók védelmét olyan, csavaros megoldásokkal kell megoldani, melyek csatlakozás esetén, és kihúzott csatlakozóval is képesek védelmet biztosítani.

4.6.1 Ultrahangos transzducer vízállóvá tétele

A vízben való mérések elvégzéséhez a transzducert vízhatlanná kellett tennem. Ehhez Synolite polimer öntőgyantát használtam. Ez ugyan nem élelmiszerbarát, azonban a gyors mérésekhez elkerülhetetlen volt. A kétkomponensű polimer öntőgyantát összekeverni nem volt nehéz, azonban rendkívül mérgező gőzei miatt elkerülhetetlen volt az óvatosság. Az öntőgyanta az alapkomponeensébe belekevert Curox térhálósító szer hatására szépen lassan keményedni kezdett, majd néhány óra leforgása alatt teljesen megkeményedett.



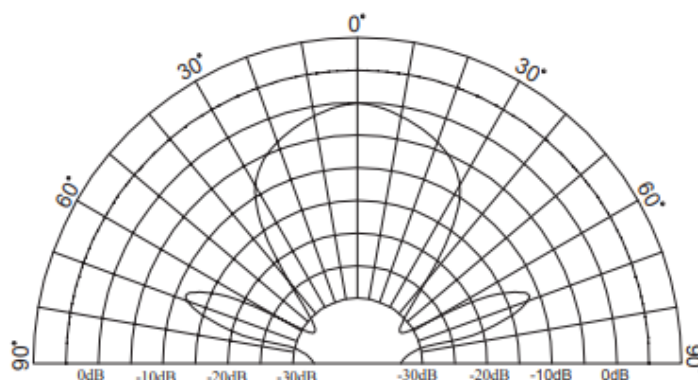
32. ábra A polimergyantával kiöntött transzducer

5 Mérések az elkészült rendszeren

5.1 Mérések leírása

Az elkészült rendszeren végzett első mérések természetesen a rendszer működésére irányulnak, és csak jelzésértékűek. Ilyen módon meg kell vizsgálnunk néhány mérést azért, hogy gyorsan megállapíthassuk, a rendszer működik. Ezek után következhetnek azok a mérések, amik komoly információt hordoznak az elkészült rendszerről.

Mivel az elkészült rendszer alapvető feladata a besugárzás lesz, így fontos, hogy ismerjük a sugárzási karakterisztikáját. A sugárzási karakterisztika, hasonló irányított antennához, polárdiagramon ábrázolható. 33. ábra A polárdiagram jellegzetessége, hogy az x tengelyen, távolság helyett fokbeosztás található, így a kívánt koordináta egy szöggel és egy távolsággal jellemezhető. Ez lehetőséget ad arra, hogy a szórófejből kisugárzó hullámot fél, vagy akár teljes kör mentén jellemezzük.



33. ábra Polárdiagram

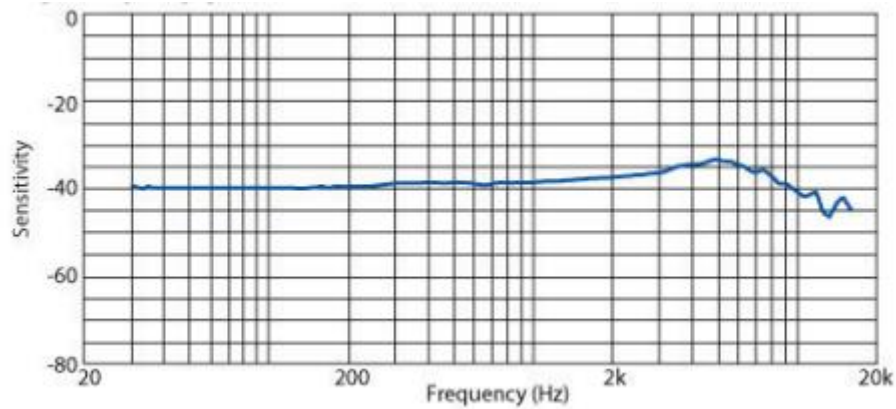
5.2 Mérőrendszer kialakítása

5.2.1 Mérőrendszer részei

5.2.1.1 Mikrofon és erősítő

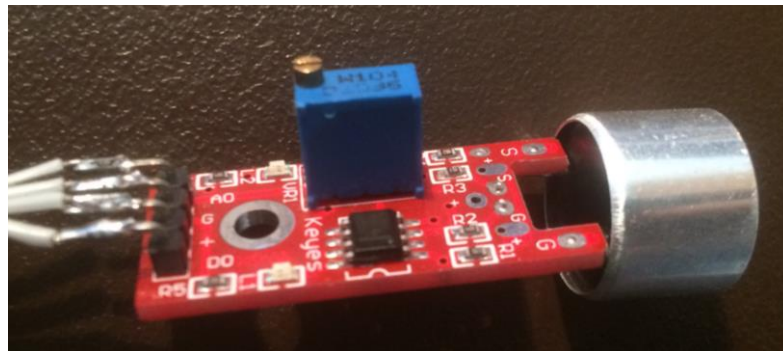
Mikrofonnak a Pojects Unlimited termékét használtam, az AOM-6738L-R névre hallgató mikrofont. Azért választottam ezt a terméket, mert a hagyományos, piacon kapható mikrofonokkal ellentétben 20kHz környékén is még egészen jó volt a

frekvenciamenete. Más, hangsávba tervezett audio mikrofonok nincsenek ilyen helyen dokumentálva. A mikrofon frekvenciamenete a 34.ábrán látható.



34. ábra A felhasznált mikrofon frekvenciamenete

A bejövő audio jel előerősítésére egy előre elkészített LM386-os IC-n alapuló erősítőkart használtam. Ez az erősítő a mikrofon jelét felerősíti annyira, hogy számítógéppel kényelmesen feldolgozható legyen. Az erősített jelet egy négypólusú jack csatlakozón keresztül a számítógémem mikrofon bemenetére vittem, ahol számítógépes programokkal dolgoztam fel. Az erősítőt a számítógép USB portjáról tápláltam.



35. ábra A felhasznált mikrofon

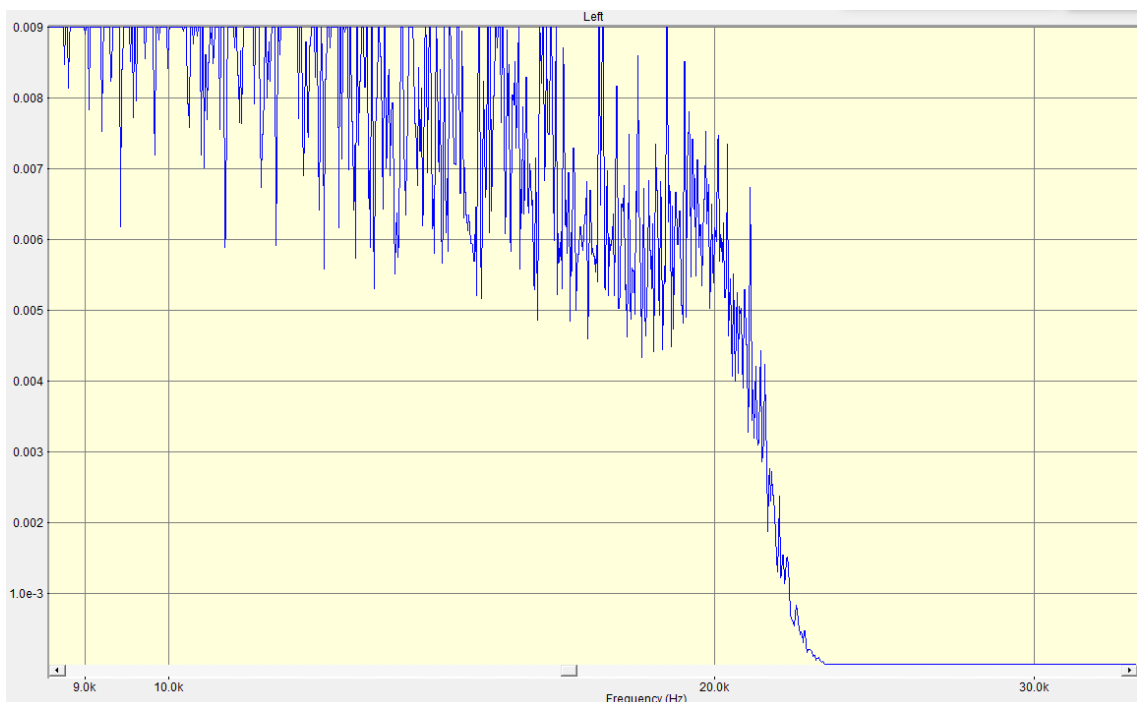
5.2.1.2 FFT szoftver

Az audio spektrum vizsgálatára és a mérések elvégzésére a SpectralPlus RT, Real Time edition ingyenes próbaverzióját használtam. [11] Ez a szoftver lehetővé tette a vonalas spektrum mérést, és számos beállítási lehetőséget adott. Állíthattam a mintavételi frekvenciát, a kvantálás mértékét, és a képernyőn megjelenő frekvenciasávot. A mintavételi frekvenciát itt is 88200Hz-re állítottam 24 bit

felbontással, a frekvenciafelbontást keskenysávú FFT-re. Fontos, hogy mind az amplitúdó, mind pedig a frekvencia tengelyt lineárisra kellett állítani, hiszen így lehetett megfelelő felbontással látni a jelet.

5.2.2 Mintavételi probléma

Mint ahogyan korábban említettem, a számítógép mintavételi frekvenciájának átállítása fontos volt a mérés elvégzésének érdekében. A számítógép tudja, hogy a mintavételi frekvencia fele után már nem lehet érdemben adat, így oda minden beállított mintavételi frekvencia esetén egy aluláteresztő szűrőt tesz. Átállítás előtt a következő spektrumkép volt látható:



36. ábra A 44100Hz-es mintavételi frekvenciához tartozó LPF

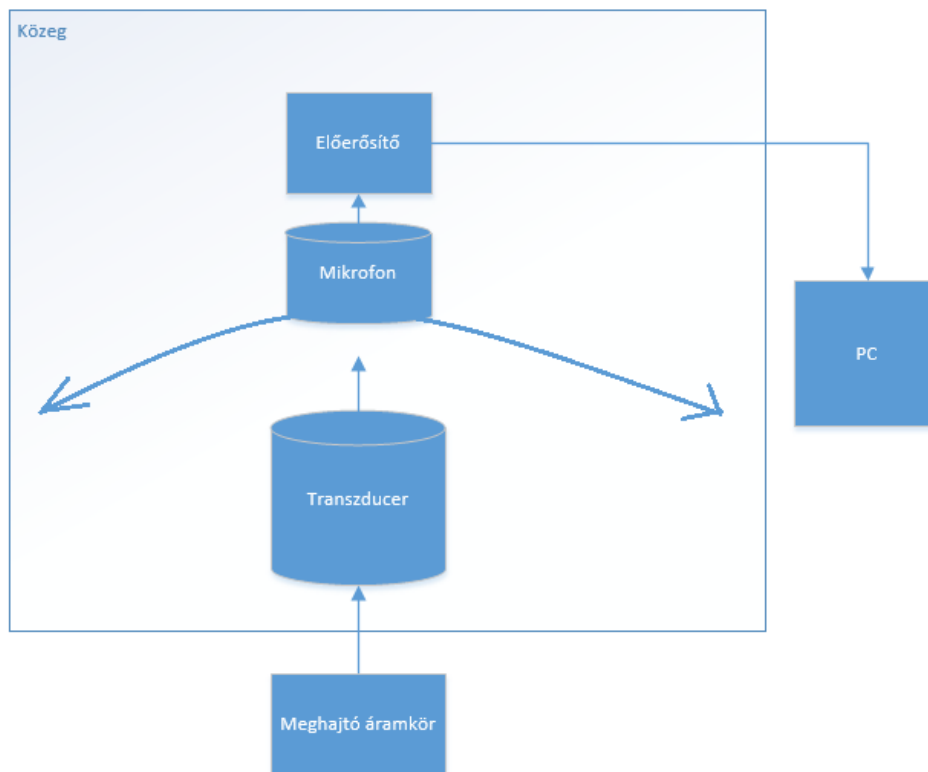
A képről egyértelműen kitűnik, hogy a 44100Hz-es mintavételi frekvencia van beállítva, hiszen megközelítőleg 22050Hz-nél történik a letörés. A mintavételi frekvenciát átállítva ez a letörés megszűnt.

5.3 Mérések szabad levegőn

Az előző pontok alapján a karakterisztika méréseknek van létjogosultsága. A szórófej ultrahangot bocsájt ki, ahogyan szeretnénk volna, így a mérések sorozata a pontosabb, alaposabb tulajdonságok mérésével folytatható. A méréseket a fent említett szórófejjel és mikrofonnal végeztem. A mérési pontokat 0 foktól 180 fokig vettem fel, 15 fokenként. Erre azért volt szükség, mert így a mérés segítéséhez való vonalas papírt könnyedén kézzel is meg lehetett rajzolni.

A mérési elrendezés az alábbi ábrán látható. A transzducer alja egy satuba van fogva, így stabilan egyhelyben marad. Fontos, hogy felfelé néz, így nincsenek reflexiók. Alá van helyezve a korábban említett beosztás, a mérési pontokkal. A mérést végző mikrofont egy pálca végére helyeztem, így fix távolságból lehetett mérni.

Fontos megemlíteni, hogy az ultrahangot, bár az ember nem hallja, érzékeli. Ilyen módon a transzducerből kijövő, halknak nem nevezhető ultrahangot hallani nem lehetett ugyan, de egy kellemetlen bizsergés a dobhártyán emlékeztetett arra, hogy éppen be van kapcsolva a rendszer. Éppen ezért a méréseket füldugóban végeztem, hiszen minden mérésnél fontos a mérő személy épsége.

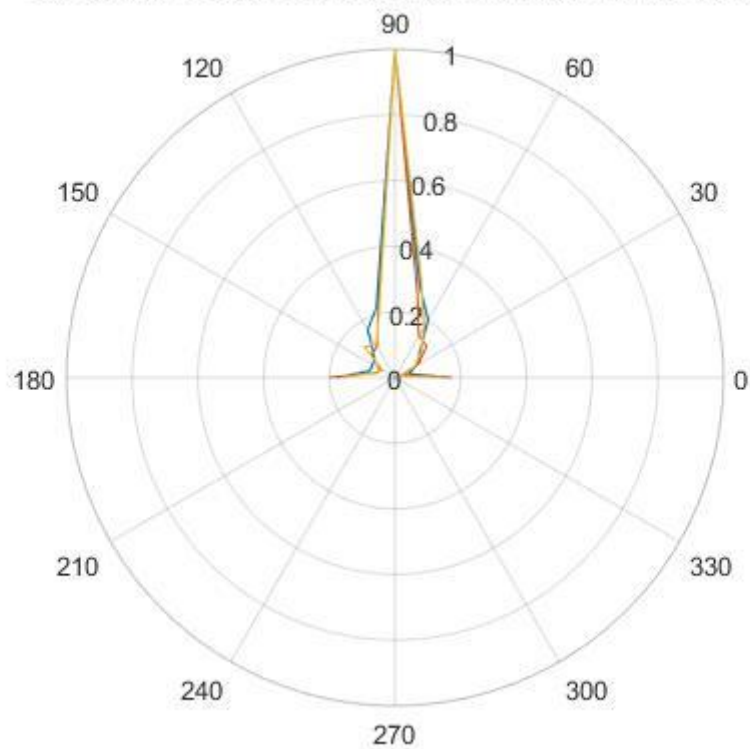


37. ábra A mérési elrendezés

A mérési eredmények az alábbi ábrán láthatók. A mért adatokat normáltam (elosztottam a legnagyobbal), hiszen számunkra csak az arányok fontosak ebben az esetben. Az ábrát a MATLAB segítségével készítettem, mivel itt lehetett a legegyszerűbben polárdiagramot készíteni a $polarplot(\rho, data)$ függvénnyel.

Látható, hogy a transzducer irányélessége igen nagy, melléknyalábok kevésbé találhatóak rajta. A grafikon amplitúdóskálája lineáris beosztású, így még érdekesebb, hogy mennyire alacsonyok a nem főnyalábba eső amplitudók.

Ultrahangos transzducer karakterisztika az X-Z síkon



38. ábra Transzducer karakterisztika szabad levegőn

5.4 Mérések vízben

5.4.1 Elvárások

A hang terjedési sebessége minden anyagban annak fizikai jellemzőitől függ. Levegőben 330 m/s, azonban vízben már jóval magasabb, a 1. táblázatról leolvasható, hogy 1497m/s a terjedési sebesség.

Aceton	1192
Glicerin	1923
Paraffinolaj	1381
Víz	1497
Alumínium	6260
Réz	4700
Acél	5850
Plexiüveg	2640

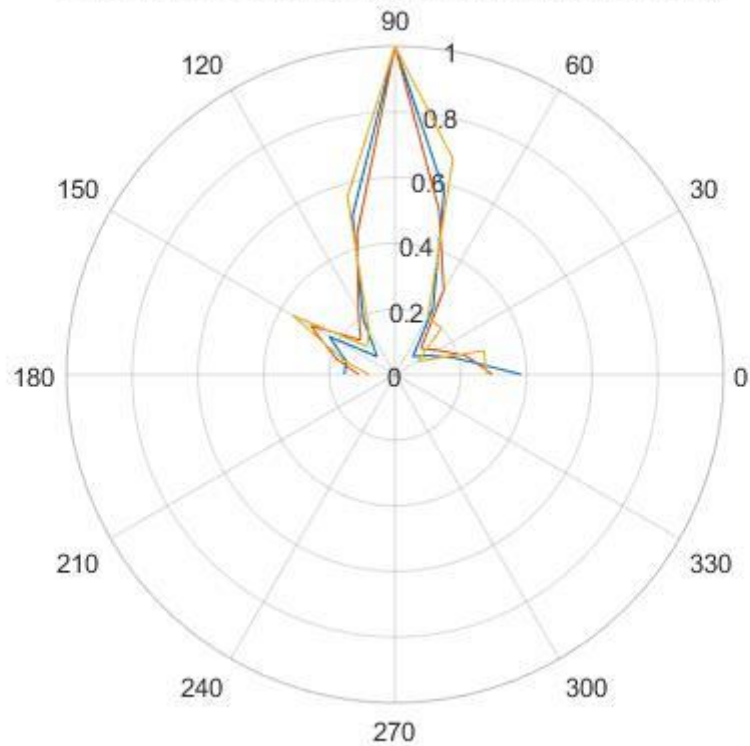
1. Táblázat A hang terjedési sebessége különböző anyagokban [m/s]

Mivel vízben a hang terjedési sebessége a levegőhöz képest több, mint négyszeres, így a karakterisztikában is változást várunk. A megnövekedett terjedési sebesség miatt a karakterisztika kiszélesedése az elvárt.

5.4.2 A mérés

A transzducer karakterisztikájának mérése vízben nagyon hasonlóan történt a szabad levegőn történő méréshez. A mérést egy kád vízben hajtottam végre, a transzducer vízhatlanná tétele után. A kádba annyi vizet töltöttem, hogy a transzducer magasságának többszöröse legyen. A mérés megkezdése előtt alaposan ellenőriztem, hogy valóban jó-e a szigetelés, végrehajtottam egy ellenállásmérést a transzducer pólusai között. Miután mindent rendben találtam, beüzemeltam a rendszert. A transzducert felfele irányítottam, így lényegesen csökkent az esély a visszaverődésekre, melyek meghamisíthatják a mérési eredményeket. A mikrofon vízhatlanítását, azaz a hidrofon elkészítését egy gumikesztyű ujjából levágott darab gumival oldottam meg. Ez azért volt jobb megoldás, mint a teljes kiöntés gyantával, mert így nem vesztettünk sokat az érzékenységből. A berendezések a mérés ideje alatt üzemszerűen működtek, meghibásodás nem fordul elő.

Ultrahang transzducer karakterisztikája vízben



39. ábra A transzducer karakterisztikája vízben

A 39. ábrán látható a mérés eredménye, szintén polárdiagramon, normálva ábrázolva. Az ábrán azonnal látható, hogy az elvárt kiszélesedés megtörtént, olyan mértékben, hogy látható eredménye lett. Ez nem meglepő, hiszen a vízben a hang terjedési sebessége több, mint négyszerese a levegőben való terjedési sebességnek.

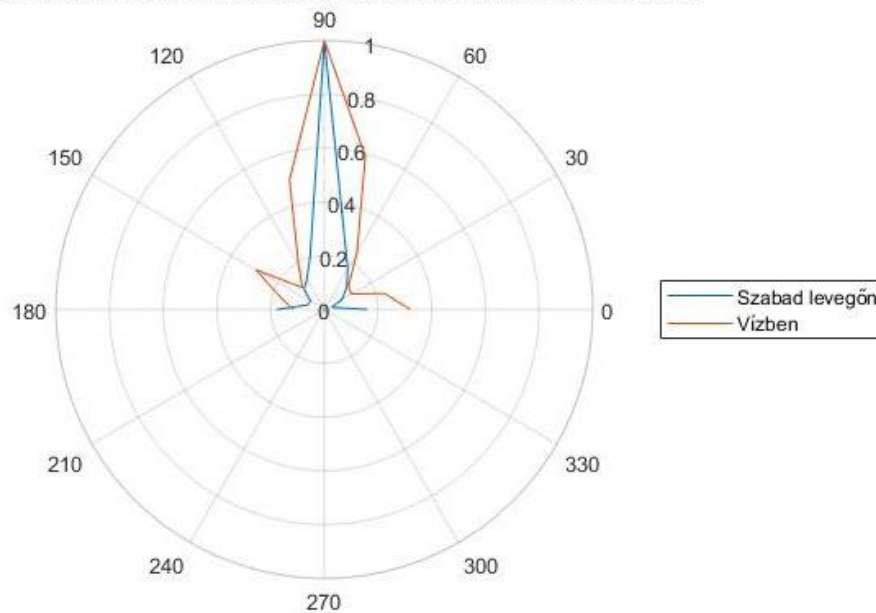
5.5 A mérések összehasonlítása

A két mérés összehasonlításához az előző mérések által mért eredményeket mérésenként átlagoltam, és egymásra rajzoltattam a polárdiagramon. Azonnal láthatóvá vált, hogy a vízben történő mérés esetén a transzducer iránykarakterisztikája valóban sokkal szélesebb, mint a szabad levegőn történt mérése.

A 3dB-es pont, az a pont, ahol a főnyalábhoz képest az amplitudó legalább 50%-kal csökken. A szabad levegőn történő mérésnél már az első mérési pontnál ez alá csökkent az amplitudó, míg a vízben történő mérés esetén ez csak a másodiknál

következett be. Ehhez a ponthoz tartozó szög az irányélesség tehát szabad levegőn kisebb, mint 30 fok, azonban vízben nagyjából pont 60 foknál található. Ez lényeges különbség a két mérés között. Ezeknek a mérési adatoknak akkor van nagy haszna, amikor a szórófejek beültetését végzik egy rendszerben, és így fontos kiszámolni a besugárzás mértékét.

Az ultrahangos szórófej karakterisztikája különböző közegekben



40. ábra A két mérési környezet összehasonlítása

5.6 Következmények, konklúzió

A mérések eredményei alapján kimondható, hogy a rendszer működik, és ultrahangot bocsát ki. Ennek az ultrahangnak a frekvenciája változtatható, és amplitúdója nagymértékben függ a szórófej rezonancia frekvenciájától és a mérés helyétől.

A két mérés összehasonlításából egyértelműen látszik, hogy a szórófej iránykarakterisztikája megváltozik, ha más akusztikus tulajdonságokkal rendelkező közegben üzemel. Ez a különbség víz esetében az iránykarakterisztika kiszélesedésében jelenik meg, mely fontos információ a hasonló rendszert tervezők számára. Az irányélességi szög ilyen mértékű megnövekedése számottevő tervezésbeli

különbségeket eredményez, hiszen a rendszer tulajdonságai alapján véve változnak meg.

A mérések eredményéből egyértelműen megállapítható, hogy minden, újabb környezetbe való elhelyezés esetén hasonló mérések végzése szükséges, a pontos és igényes tervezés érdekében. Az irányélességi szög a rendszer, illetve a szórófej olyan tulajdonsága, mely minden egyes környezetben más, és szorosan függ a felhasznált anyag fizikai tulajdonságaitól.

6 Konklúzió

A dolgozat írása közben számos gondolattal gazdagodtam. Hasonló termékek után kutattam, és megvizsgáltam, mi a piaci trend ebben a kategóriában. A technológiai áttekintés keretein belül ismertettem alaposan az erjesztés folyamatát, az ultrahang keltésének és mérésének fizikai alapjait. Ezek után elkezdtem megtervezni az eszközt. Ez a tervezés kiterjedt minden részletre, bár tudtam, hogy ebből nem fogok mindent megépíteni a prototípusban. A teljes rendszert specifikáltam alaposan. Ezt követően elkezdtem a prototípust elképzelni. Bár több komplikált funkció nem került megvalósításra az idő rövidege és a feladat prototípus volta miatt (változtatható feszültség, Ethernet kommunikáció), számos fontos funkciót is implementáltam. Ezek közé tartozott a feladat megoldása szempontjából nélkülözhetetlen ultrahang generálás, melyet egy PWM chip és egy H híd segítségével oldottam meg. Ezek mellett megoldásra került az árammérés, visszajelzés, a hőmérés lehetősége.

A mérések alatt megismerkedtem az ultrahang mérés technikájával, megtanultam, hogy a PC-ben a mintavételi frekvenciát fontos átállítani, hiszen anélkül az ultrahangot nem vagyunk képesek mintavételezni. Megismerkedtem a méréshez elkerülhetetlen audio spektrumanalizátor eszközökkel, és azok beállítási lehetőségeivel. Ezek használata igen fontos volt a pontos és informatív mérések elvégzéséhez.

Elvégeztem az iránykarakterisztika mérését, mely az elvárások szerinti eredményeket hozott. A szabad levegőn és vízben végzett mérések között valóban az volt a különbség, amit a fizika törvényei diktáltak, azaz a vízben, - a nagyobb terjedési sebesség miatt -, az iránykarakterisztika láthatóan kiszélesedett. Ennek megállapítását MATLAB-ban rajzolt polárdiagramok segítségével tudtam megtenni.

Összességében a mérések beigazolták azt, hogy a megtervezett és megépített rendszer úgy működik, ahogyan szerettem volna. A jelenlegi prototípussal tervezett további mérések, és a továbbfejlesztési irányelvek a következő pontban olvashatók.

7 További feladatok

Jelen dolgozatban elvégzett munkák után még számos feladat van, ami ennek az eszköznek a fejlesztése közben elvégezhető. Ezeket részletezem ebben a fejezetben.

A prototípus önmagában is hiányos funkcionalitású, így számos területen fejleszthető. Fontos, hogy bár megvan a lehetőség az Ethernet kommunikációra, az még nincsen lefejlesztve. Ennek az az oka, hogy hasznosabb volt egy elméleti kommunikációs tervet létrehozni, mint egy összecsapott kommunikációt. Így ennek az igényes megvalósítása még a jövő feladata.

A következő fejlettségi fokozat eléréséhez egy új hardverre lesz szükség. Ennek a bemeneti feszültségének függetlennek kell lennie a tápfeszültségektől, azaz bármilyen bemeneti feszültség esetén elő kell tudnia állítani az elektronika meghajtásához szükséges tápfeszültséget. Ennek kivitelezése alapos és körültekintő tervezést igényel, ez már a tervezés idején túlmutatott a dolgozat keretein.

Természetesen a tervezés egy megfelelő fázisában szükség lesz az eszköz házának újratervezésére, ergonómiai és design szempontok alapján is. Ezt szorosan össze kell integrálni a funkcionális tervezéssel, hiszen a hasznos működés nem áldozható fel az ergonómikus külső oltárán.

8 Irodalomjegyzék

- [1] Sheng-Loung Rd., I-Lan, „ACCELERATION OF THE AGING PROCESS IN COFFEE LIQUEUR BY ULTRASONIC WAVE TREATMENT”, (2015)
Department of Horticulture, National Ilan University, 1Taiwan 26041, China
- [2] Dr. Rácz Zsuzsanna „Vese génterápia (RNSi) és lupus nephritis IVIG kezelésének mellékhatás-vizsgálata egérmodellen”, 2012
- [3] Jonathan Lawrence Kivinen „Device for Performing Sonoporation on Adherent Cell Cultures” Thunder Bay, Ontario, Canada 2014
- [4] Lőrincz Attila, Élelmezési célú biológiai anyagok ultrahangos besugárzásának élelmiszerfizikai és mikrobiológiai vonatkozásai, MTA, 2004
- [5] Digitális Jelfeldolgozás, BME MIT Tanszéki Munkaközösség,
MIT-VIMM4084-01
- [6] <https://www.json.org/> 2018. 04. 09.
- [7] Single-Mode Piezoelectric Ultrasonic Transducer Equivalent Circuit Parameter Calculations and Optimization Using Experimental Data: Ricardo Queirós, Pedro Silva Girão, António Cruz Serra
- [8] APPLICATION NOTE – AP050913 Equivalent Circuit of Ultrasonic Transducers, Pro-Wave Electronics Corp. 2005
- [9] Dr Maráz Anna, Fermentált Élelmiszerek 2- Alkoholosan erjesztett élelmiszerek, egyetemi diasor
- [10] Understanding ultrasound induced sonoporation: Definitions and underlying mechanisms, I. Lentacker, I. De Cock, R. Deckers, S.C. De Smedt, C.T.W. Moonen, 2013
- [11] Spectra Plus RT <http://www.spectraplus.com/> 2018. 05. 24.
- [12] Ultrasonically Assisted Fermentation for Bioethanol Production
<http://www.hielscher.com/ultrasonically-assisted-fermentation-for-bioethanol-production.htm> 2018. 05. 16.
- [13] Ultrasound technology for food fermentation applications,
K Shikha Ojha, Timothy J. Mason , Colm P. O'Donnell , Joseph P Kerry ,
Brijesh K Tiwari, 2016

- [14] <https://www.telegraph.co.uk/news/newstopics/howaboutthat/3115492/Ultrasound-machine-turns-cheap-plonk-into-fine-wine-in-30-minutes-says-inventor.html> 2018. 05. 23.
- [15] Songül Şahin Ercan, Çiğdem Soysal, Use of ultrasound in food preservation, 2013
- [16] Kvalix.hu
<https://www.kvalix.hu/termekek/meroerzekelok/pozicio/magnetostrikcios/>
2018. 05. 24.

9 Ábrajegyzék

1. ábra A Hielscher ultrahangos rendszere	10
2. ábra Az erjesztéssel készülő ételek fajtái.....	12
3. ábra A glükóz átalakulása erjedés közben	12
4. ábra A hangok spektruma	14
5. ábra A piezoelektromos hatás illusztrálása	15
6. ábra Egy modern Profibuson csatolt magnetostrikciós úradó.....	16
7. ábra Az ultrahangos transzducer helyettesítő képe	16
8. ábra Egy szórófej rezonancia karakterisztikája	17
9. ábra Hidrofon.....	18
10. ábra A PC hangkártyáján beállítható mintavételi frekvenciák	20
11. ábra A rendszer vázlata.....	23
12. ábra A meghajtó modul felépítése	24
13. ábra A PWM IC blokkvázlata.....	26
14. ábra Egy ultrahangos transzducer	28
15. ábra Iránykarakterisztika.....	28
16. ábra A H hidas meghajtás kapcsolási rajzának részlete.....	29
17. ábra A H-híd működési elve	30
18. ábra A Buck kapcsolat sematikus ábrája	31
19. ábra Az árammérés elve.....	32
20. ábra Egyszerű JSON struktúra	33
21. ábra A kommunikáció JSON struktúrában	35
22. ábra Az elkészült nyomtatott áramköri lemez nézete a tervezőprogramban	38
23. ábra A beültetés kezdete a tápáramkörrel kezdődik	39
24. ábra A PWM IC jele	40

25. ábra A holtidő szemléltetése	41
26. ábra Az áram	41
27. ábra Látható, hogy a szórófej ultrahangot bocsát ki	42
28. ábra Audiospektrogram.....	42
29. ábra Hibás MOSFET vezérlőjel.....	43
30. ábra Az árammérő által mért jel	44
31. ábra Az áramkörök megvédésének módja az epoxival való kiöntés	45
32. ábra A polimergyantával kiöntött transzducer	46
33. ábra Polárdiagram	47
34. ábra A felhasznált mikrofon frekvenciamenete	48
35. ábra A felhasznált mikrofon	48
36. ábra A 44100Hz-es mintavételi frekvenciához tartozó LPF.....	49
37. ábra A mérési elrendezés	51
38. ábra Transzducer karakterisztika szabad levegőn.....	52
39. ábra A transzducer karakterisztikája vízben	54
40. ábra A két mérési környezet összehasonlítása	55

10 Függelék

10.1 A felhasznált eszközök listája

- RIGOL DS1054 négycsatornás oszcilloszkóp
- Voltcraft forrasztóállomás
- Multiméter
- Számológép
- PC, Windows operációs rendszerrel (egyetemi licenz)

10.2 A felhasznált szoftverek listája

- MATLAB (egyetemi licenz)
- SpectraPlus RT (próbaverzió, 30 napos)
- Audacity
- Eagle (próbaverzió)

10.3 A mérési elrendezés

