

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

**Hasznos László**

**Jelfeldolgozó processzor alapú fémdetektor készítése**

Konzulens  
Orosz György  
Budapest, 2011

## Tartalomjegyzék

1.Előszó.....	5
2.A fémdetektálás alapelve.....	7
2.1.Általános információk .....	7
2.2.A távolság hatása.....	7
2.3.Az alak hatása.....	8
2.4.A fém típusának meghatározása.....	8
3.Különböző típusú fémkeresők áttekintése.....	10
3.1.BFO-s fémkeresők.....	10
3.2.PI-detektorok.....	10
3.3.Induktív híd (IB).....	11
3.4.Off resonance típus.....	12
3.5.A VLF kereső.....	13
3.6.A Drop-out kereső.....	13
4.Saját fémkereső működése.....	14
4.1.Elméleti háttér.....	14
4.1.1.Fémdetektálás elméleti háttére.....	14
4.1.2.Rezonátoros megfigyelő algoritmus elméleti háttére.....	20
4.2.Rendszerterv.....	23
5.Felhasznált eszközök.....	27
5.1.Jelfeldolgozó processzor.....	27
5.2.Mikrovezérlő.....	28
5.3.Szenzorok.....	29
5.4.Egyéb kiegészítők.....	32
6.A szenzorkártya hardveres felépítése.....	34
7.A rendszer szoftveres felépítése.....	39
7.1.Jelfeldolgozó processzor.....	39
7.1.1.Szoftver működésének bemutatása.....	39
7.1.2.Rezonátoros megfigyelő algoritmus.....	45
7.1.3.Többszenzoros fémkereső algoritmus.....	48
7.2.A mikrovezérlő programja.....	51
7.3.A PC-s adatgyűjtő programja.....	52
8.Mérési eredmények.....	55
9.Összefoglalás.....	62
10.Irodalomjegyzék.....	63

## Hallgatói nyilatkozat

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

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált 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, 2011.12.13

.....  
Hasznos László

# Kivonat

A történelem során a fémek kiemelt szerepet kaptak. Többek között fizetőeszközök, edények, ékszerek, fegyverek és még számos helyen alkalmaztak/alkalmaznak fémeket. Mivel a fémek kiemelt értéket kaptak a történelemben, ezért a fémkeresésre is kifejlesztett az emberiség különböző eszközöket az elektronika segítségével. A fémek egyik jelentős tulajdonsága a szilárdságuk mellett, hogy elektromos vezetők. Ezt, illetve egyes fémek ferromágnességét használják ki a fémkeresők is. Ezen tulajdonságaikon keresztül a fémek módosítják a fémkereső által generált elektromágneses teret, amelyet a fémkereső érzékel.

Az eddig alkalmazásban levő fémkeresők többsége egy érzékelőt tartalmaz, amellyel a keresési terület fölött oldalirányban is pásztázva, emellett előre haladva lehet fémet keresni. Ezek általában hangjelzést adnak, ha fémet detektáltak. Ezen szakdolgozat célja egy olyan fémdetektor prototípusának elkészítése, amellyel nem kell pásztázni, hanem elég a keresési területet "szkennelni". Nem hangjelzést ad, hanem PC-n szemléletesen 3D-s képet jelenít meg a föld alatt levő fémekről, illetve számítógép hiányában különböző színű fényjelzést ad a fém típusától függően.

# Abstract

In history metals always played an important role. Money, pottery, jewelery, weapons and in many other cases metals played an important role. Because of their importance in history, several means of metal detection have also been developed with the help of electronics. Besides their solidity, their electrical conductivity is one of their important features. This, and also ferromagnetism makes it possible to detect metals. Through these features, metals change the electromagnetic field generated by the detector, which is sensed by the detector.

Most of metal detectors in use today have one sensor that has to be moved to the side directions while moving forward. These give a sound when detecting metals. The purpose of this thesis is to create a prototype of such a metal detector that does not need to be moved to the side, only scan the area that is suspected to contain metal. It does not sign by sound, but it presents a 3D image of pieces of metals under the soil on PC, and in lack of a computer it gives light sign of different colours depending on the type of metal.

# 1. Előszó

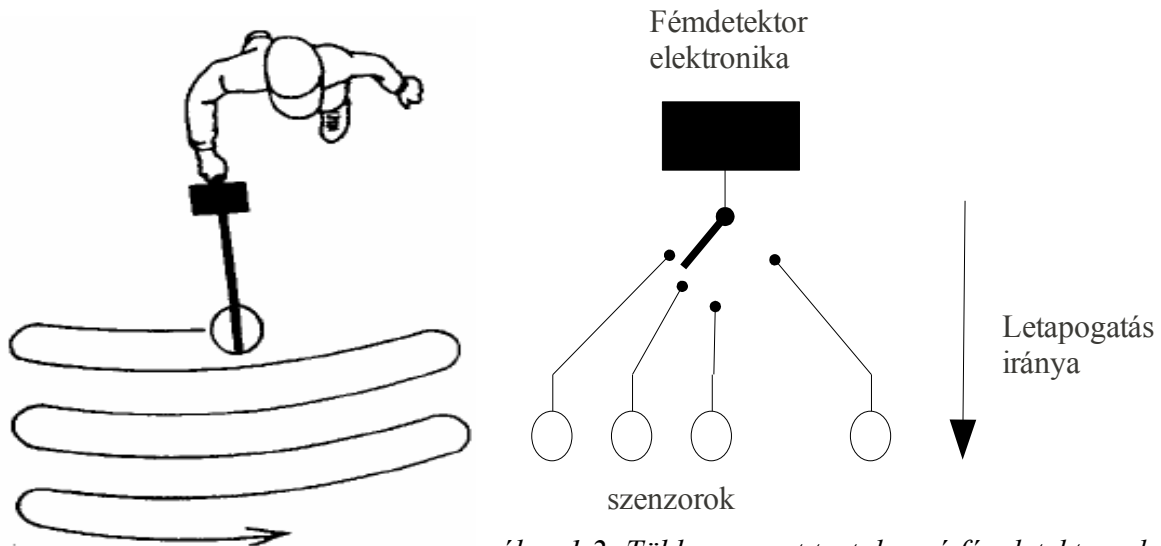
A fémdetektorok fémből készült tárgyak jelenlétét indikáló eszközök. A fémdetektorok általában a fémek mágneses teret befolyásoló tulajdonságát használják detektáláshoz. Alkalmazhatóak egyszerű indikátorként, de kifinomultabb eszközök alkalmasak akár fémek típusának meghatározására is. Felhasználási területtől függően érzékenységük általában néhány cm-től több tíz cm-ig terjed. A fémdetektorok jellemző felhasználási területei például régészeti kutatások, ahol föld által elfedett leletek feltárására használhatóak, alkalmazhatjuk a fémdetektorokat építőiparban a fémből készült beépített szerkezeti elemek felderítésére, vagy katonai célra például aknák pozícióinak meghatározására. A fémdetektorok tágabb értelemben vett felhasználása például kontaktszenzorok alkalmazása, vagy forgalomirányító rendszerekben gépjárművek érzékelése (például egy kis- és nagyforgalmú út kereszteződésekor a kisforgalmú út akkor kap zöld jelzést, ha várakozó járművet érzékelt a rendszer a kereszteződésben).

Szakedolgozatom feladata egy jelfeldolgozó processzor (DSP: Digital Signal Processor) felhasználásával működő fémdetektor prototípusának megvalósítása, mely alkalmas több keresőszenzor jelének kezelésére. A hagyományos, egyetlen keresőfejjel rendelkező fémdetektorok esetében egy terület átvizsgálása a keresőfej oldalirányú folytonos pásztázó mozgatásával lehetséges. A több szenzor alkalmazásának előnye, hogy a szenzorok jelei egyszerre, vagy legalábbis elektronikus kapcsolat segítségével egymás után gyorsan feldolgozhatóak, mely egyszerűbbé és gyorsabbá teszi egy adott terület átvizsgálását. Ennek illusztrálására szolgál az 1.1 illetve az 1.2 ábra.

A megvalósított fémdetektor működése azon alapszik, hogy egy tekercs közelébe helyezett fémtárgy hatására megváltozik a tekercs komplex impedanciája. Amennyiben ezt a tekercset egy szinuszos jellel meghajtott feszültségosztó áramkör tagjaként használjuk, az impedancia megváltozása a feszültségosztó kimeneti feszültség komplex amplitúdójának (fazorának) megváltozását okozza. A megváltozás amplitúdójából és fázisából következtethetünk a tekercs közelébe kerülő fém távolságára és típusára.

A rendszerben alkalmazott gerjesztőjelek előállítására és a válaszjelek mérésére egy 32 bites lebegőpontos processzor segítségével történik. A lebegőpontos aritmetika nagy pontosságú számítást tesz lehetővé. A processzor a szenzorokat időmultiplex módon kezeli. A bemutatásra kerülő rendszer nyolc darab szenzort tartalmaz. A digitális jelfeldolgozás révén a rendszer lehetővé teszi a mérési

adatok utólagos grafikus megjelenítését az eszközhöz csatlakoztatott PC segítségével. A mérési eredmények valós idejű megjelenítése a szenzorokhoz rendelt LED-ek segítségével történik. Minden szenzorhoz kétféle színű LED tartozik, melyek különböző színkombinációkkal alkalmasak egymástól jelentősen eltérő fémtípusok jelzésére. A LED-ek fényerejével a fémek közelségét jelezzük.



ábra 1.1: Hagyományos letapogatás [2]

ábra 1.2: Több szenzort tartalmazó fémdetektorral történő letapogatás

A dolgozat a következő módon épül fel. A következő két fejezetben bemutatásra kerülnek a fémdetektorokban alkalmazott detektálási módszerek, illetve a széleskörben elterjedt fémkereső eszközök felépítése.

A negyedik fejezetben mutatom be az általam elkészített eszközben alkalmazott fémdetektációs alapelvet, illetve a módszer megvalósításához felhasznált jelfeldolgozási algoritmust. Szintén ebben a fejezetben található az eszköz rendszerterve.

Az ezt követő két fejezetben bemutatom a fémdetektorban felhasznált eszközöket és alkatrészeket, illetve a megvalósított hardver fizikai felépítését.

A hetedik fejezetben találhatóak a szoftveres megvalósítás részletei. A fejezetben bemutatom a DSP, a PC valamint a keresőfejen található mikrokontroller programjának működését.

Az utolsó fejezetben mérési eredmények találhatóak a megvalósított rendszerről.

## 2. A fémdetektálás alapelve

Ebben a fejezetben általában az [1] illetve [2] források ismeretére támaszkodtam.

### 2.1. Általános információk

A fémkeresők alapvetően a fémek más anyagoktól eltérő anyagi tulajdonságait használják ki. Ez a két tulajdonság, hogy jó elektromos vezetők, és egyes fémek nagy relatív permeabilitással rendelkeznek.

A fémkeresők legfontosabb része az az eszköz, amellyel az időben változó mágneses mezőt létrehozza, ezt rendszerint áramjárta tekercsrel lehet megoldani. A fémkeresők egy része olyan felépítésű, hogy külön gerjesztő-, és külön keresőtekercsrel van felszerelve, míg más típusoknál ez a kettő egy és ugyanaz. A gerjesztőtekercs funkciója, hogy (nem elhanyagolható) időben változó mágneses mezőt generáljon egy bizonyos térfogatban, ahol a fémet sejtjük. Erre a mágneses mezőre a fémek válaszjelet sugároznak az említett tulajdonságaik miatt. Egyfelől a váltakozó mágneses mező hatására a fémekben áramok indukálódnak, amelyek szintén időben változó mágneses mezőt generálnak, és ezen mágneses indukciós erővonalak egy része visszakerül a keresőtekercsbe, amely ezt érzékeli. Másfelől egyes fémek ferromágneses anyagok, azaz a beléjük eső mágneses indukciót felerősítik, és ezen felerősödött mágneses indukciós vonalakat a keresőtekercs érzékeli.

Sajnos nem csak a fémek között vannak jó vezetők, ez gyakran meg is zavarja a fémkereső eszközöket. Például a nedves talaj is képes fémként viselkedni, hiszen valamilyen mértékben vezeti az áramot. Ezt egyes eszközök képesek kompenzálni, azonban ez mindenképpen az érzékenység romlásához vezet. [2]

### 2.2. A távolság hatása

A válaszjel erőssége a távolság növelésével drasztikusan csökken. Ez azért van, mert a generált mágneses tér Maxwell IV. Törvénye szerint  $\frac{1}{r}$  -rel arányos. A tekercs árama által generált időben változó mágneses tér a fémekben időben változó áramot gerjeszt, amely szintén időben változó mágneses teret generál vissza a tekercsbe, így tehát már legalább  $\frac{1}{r^2}$  -es szorzót kap a válaszjel a



gerjesztőjelhez képest. Ezen felül igaz még, hogy a a tekercs által generált erővonalak valahányad része kerül csak a fémbe, és fordítva. Ez a hatás a távolság növekedésével szintén gyengíti a válaszjelet, tehát a távolságtól függés még erősebbnek bizonyul. Gyakorlatban 2-szeres távolság több tízszeres, 4-szeres távolság már több ezerszeres eltérést okozhat a válaszjelben. [2]

### 2.3. Az alak hatása

A para- illetve diamágneses anyagok esetében a válaszjel főleg a bennük keletkező köráramok miatt keletkezik. Éppen ezért ezen fémeknél akkor erős a válaszjel, ha a legnagyobb felületükkel a keresőtekercs felé állnak, mert ekkor tud a legnagyobb hurokban folyni az áram. Néhány példa ilyen típusú fémek érzékelésére: kedvezőbb, ha egy nagy felületű fém van, mint ha összterületüket tekintve megegyező méretű, de szétszabdalt fémfelülettel állunk szemben. Kevésbé érzékelünk például egy gyűrűt, mint egy ugyanakkora átmérőjű és anyagú pénzérmét. Ha a gyűrű meg van szakítva, akkor még kevésbé érzékelhető.

A ferromágneses anyagoknál nem akkor érzékeljük a legerősebb válaszjelet, amikor a legnagyobb felülettel áll a tekercs felé, hanem akkor, ha ez a legnagyobb felületű sík párhuzamos a tekercs tengelyével.

A tömeg nem számít a fém észlelése szempontjából, illetve a vastagság is csak néhány tizedmiliméter alatt válik jelentőssé. [2]

### 2.4. A fém típusának meghatározása

Egyes fémkeresők képesek a fém típusának valamilyen mértékű meghatározására. Az ilyen fémkeresők azt használják ki, hogy a fémek által sugárzott válaszjel  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  -os fázistolást tartalmazhat az adótekercs jeléhez képest, és ezt valamilyen módon jelezni tudják.

$0^{\circ}$ -os fázistolású válaszjelet alapvetően a tökéletes szigetelő, viszont végtelen permeabilitású fémek tudnának sugározni (ha létezne ilyen). Ezek a fémek ugyanis csak növelik a csatolást a kereső és adótekercs között. A valóságban létező, ehhez legjobban hasonlító tulajdonságú fémek a ferromágneses fémek (vas, nikkelt, kobalt), ezeknél ugyanis eltörpül a köráramokból származó válaszjel a ferromágnesség mellett.

$180^{\circ}$ -os fázistolású válaszjelet a szupravetítő paramágneses/diamágneses anyagok tudnának sugározni. Itt ugyanis Lenz törvénye szerint a köráram iránya olyan lesz, hogy ellensúlyozza az őt

létrehozó hatást, tehát ellentétes fázisú lesz a válaszel. A valóságban létező, ehhez legjobban hasonlító tulajdonságú fém az ezüst, amelynél  $160^{\circ}$ ... $170^{\circ}$ -os fázistolást kapunk.

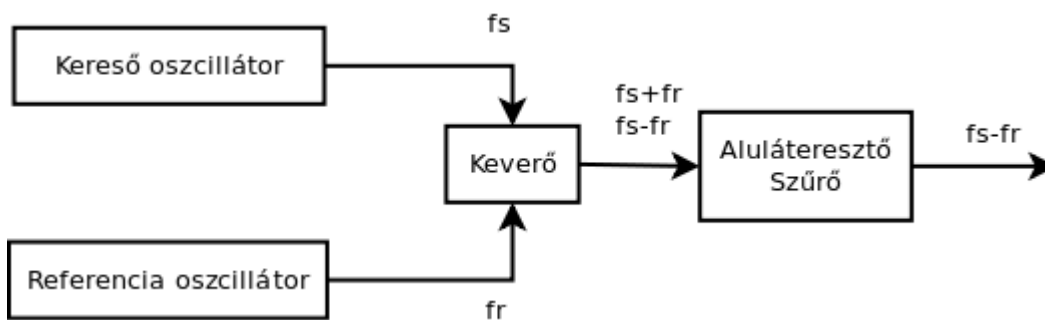
Ezen két szélsőérték bármilyen keveréke előfordulhat, attól függően hogy milyen mértékű az örvényáramos, ill. a ferromágneses hatás. Ezt sajnos nem csak a fém típusa, hanem pl. a keresőfejhez képesti elhelyezkedése/iránya is befolyásolja. Ezért nem tökéletesen lehet megmondani a fém típusát, de azért mégis le lehet vonni néhány következtetést. [1] [2]

## 3. Különböző típusú fémkeresők áttekintése

### 3.1. BFO-s fémkeresők

A rövidítés az angol Beat Frequency Oscillator szavakból ered, magyarul keverős rendszerű fémkeresőnek hívjuk. Ez a típus tartalmaz két LC rezgőkört. Ezen rezgőkörök pontosan ugyanarra a frekvenciára vannak hangolva. Egyik rezgőkörben az induktivitás maga a keresőtekercs, a másikban pedig egy referencia tekercs található. Mindkét rezgőkör kimenete egy frekvencia keverőre csatlakozik, amely előállítja a frekvenciák összegét, különbségét, és egyéb keverési termékeket. A keverő kimenetére egy aluláteresztő tag csatlakozik, így csak a két frekvencia különbsége marad meg. Így ha a keresőtekercs közelébe fém kerül, a keresőtekercs rezgőköre elhangolódik, és a szűrő kimenetén megjelenik a különbségi jel.

Rendszerint úgy választják meg a rezonanciafrekvenciákat, hogy változás esetén a különbségük hangfrekvenciás tartományba essék, így a jel felhasználható később hangjelzésként is. A 3.1 ábrán látható a BFO-s fémkereső blokkdiagramja. [1]

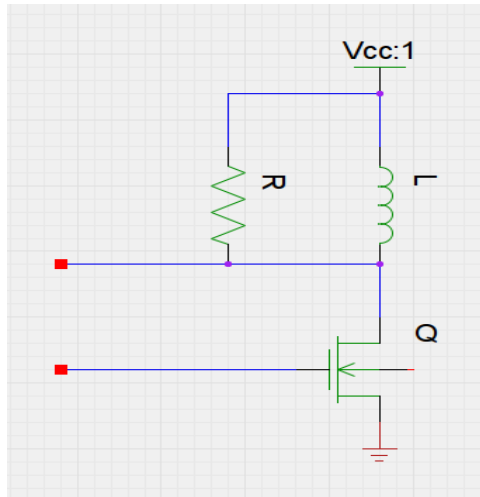


ábra 3.1. - BFO-s fémkereső blokkdiagramja

### 3.2. PI-detektorok

A rövidítés az angol Pulse Induction szavakból ered, magyarul impulzusüzemű fém-detektornak hívjuk. Ebben az esetben a talajt nem szinuszos jellel vizsgáljuk, hanem impulzusokkal bombázzuk. A keresőtekercset a tápfeszültség és föld közé kötjük, sorosan egy kapcsolótranszisztorral, illetve a tekercsel párhuzamosan kötünk egy  $R$  ellenállást is. Ezen ellenállással hangoljuk a lecsengés maximumát és időállandóját. Mivel a tekercs ohmos ellenállása kicsi, ezért igen nagy áram alakul ki

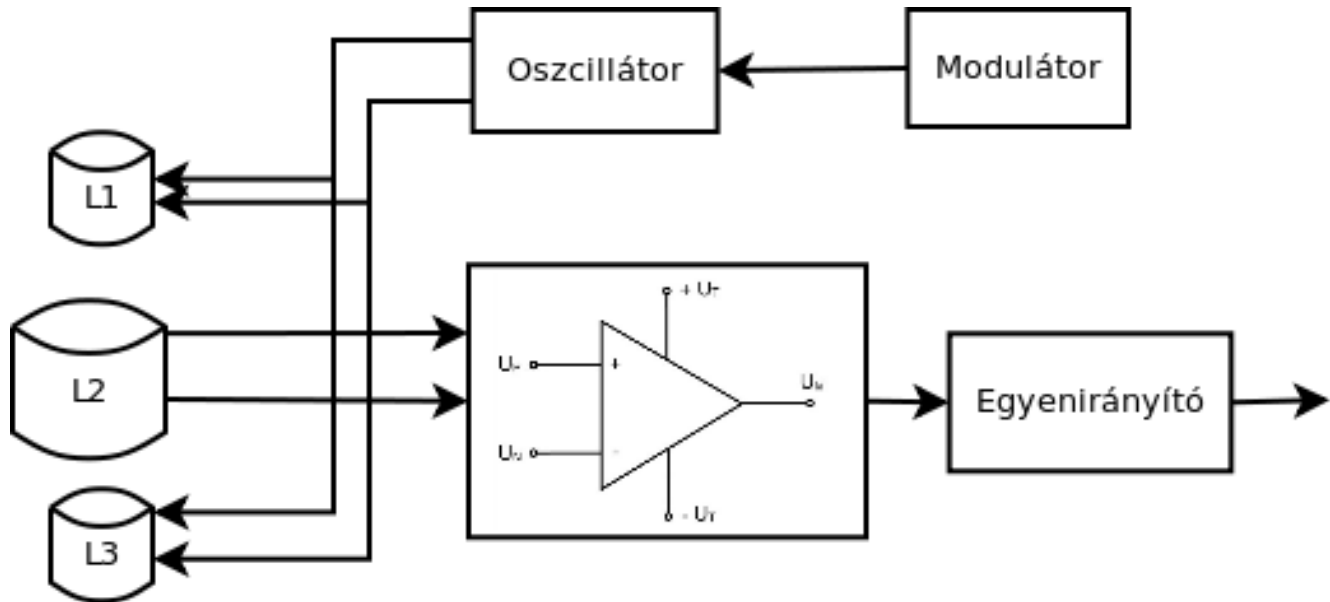
rajta a tranzisztor bekapcsolt állapotában. Ha az áramot megszakítjuk, azaz kikapcsoljuk a tranzisztort, akkor Lenz törvénye miatt a tekercsen nagyon nagy feszültség jelenik meg, amely fent akarja tartani az eddigi áramot. Ezen feszültség exponenciális időbeli lecsengése változik meg a keresőtekercs környezetébe kerülő fém hatására. Ezt használja ki a PI detektor. Az ilyen rendszerű fémdetektor nem képes a fémtípusok megkülönböztetésére. [1]



ábra 3.2: Impulzusüzemű fémdetektor keresőtekercse

### 3.3. Induktív híd (IB)

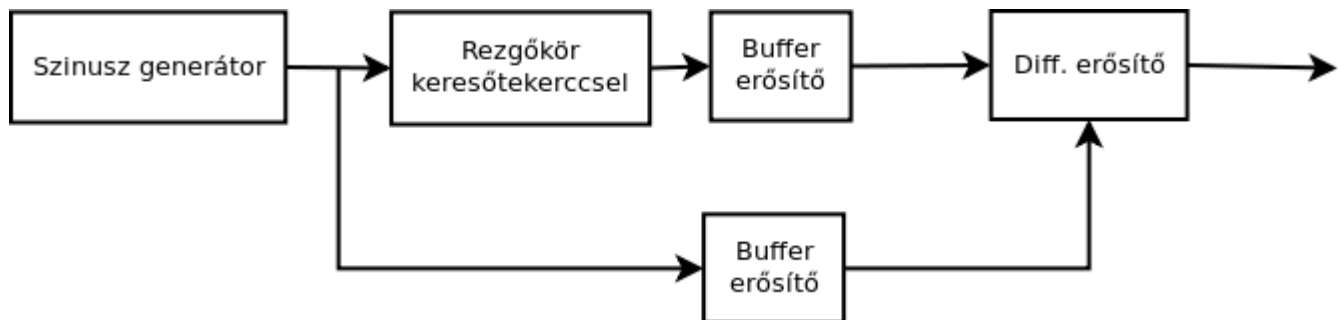
Az IB az angol Inductive Balance szóból ered. Az ilyen fémkeresőkben az oszcillátor két tekercset táplál. Ezen két tekercs tekercselési iránya ellentétes, így egymásra helyezve őket, a kettő közötti mágneses tér elvileg zérus. A harmadik tekercs a előbbi kettő között helyezkedik el, és ennek kivezetésein elvileg nincs feszültség. Amikor fém kerül a tekercsek közelébe, az aszimmetrikus elrendetés miatt felbomlik a mágneses mező kiegyenlítetttsége, és ez a középső (keresőtekercsben) feszültséget indukál. Ezen jelet felerősítve és egyenirányítva (mivel az oszcillátor amplitúdómodulált, ezért ez demodulálás) hangfrekvenciás jelet kapunk a fülhallgatón. Az IB típusú fémkereső blokkdiagramját lást a 3.3 ábrán.[1]



ábra 3.3: Az IB típusú fémkereső blokkdiagramja

### 3.4. Off resonance típus

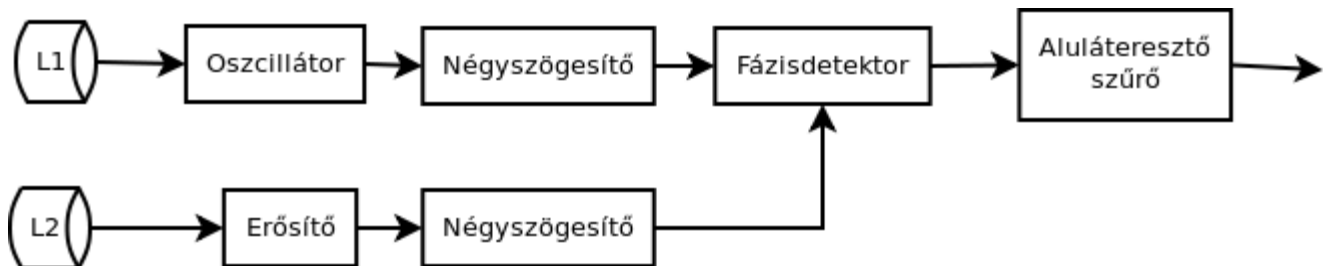
Ezen detektort magyarul félrehangolt rezgőkörűnek hívjuk. A keresőfej közelébe kerülő fémtárgytól a tekercs önindukciós tényezője, és ezáltal a rezonanciafrekvenciája is megváltozik, azaz félrehangolódik a generátor frekvenciájáról. Ennek következtében a rezgőkör kimenetén csökkenő feszültség lesz tapasztalható, amely némi kondicionálás után a főgenerátor jelével egy differenciálerősítő bemenetére kerül, és annak kimenetén a különbséggel arányos jel jelenik meg. [1]



ábra 3.4: Off resonance fémkereső blokkdiagramja

### 3.5. A VLF kereső

A név az angol Very Low Frequency Phase Angle kifejezésből adódik, magyarul igen alacsony frekvencia-fázisszög keresőnek hívjuk. Ez azért előnyös, mert alacsony frekvenciákon a skin hatás kevésbé jelentős, azaz nagyobb örvényáramok folyhatnak, így könnyebbé válik a fémek megkülönböztetése. Hátránya, hogy alacsony frekvenciákon a tekercsben létrejövő változások sokkal gyengébbek, így bonyolultabb jelfeldolgozás szükséges. Ebben a konstrukcióban az oszcillátor meghajtja az adótekercset, míg egy másik tekercs csak pick-up-ként szerepel. Mindkét tekercs jele egy négyszögesítés után fázisdetektorra kerül, amely kimenetén a fém fázistolásával arányos jel jelenik meg. [1]



ábra 3.5: VLF típusú fémdetektor blokkdiagramja

### 3.6. A Drop-out kereső

A Drop-out, azaz magyarul abszorpciós kereső működési elve az örvényáramok, illetve a mágneses hiszterézis által elvesztett veszteségen alapul. A keresőtekercs jelét egy oszcillátorral nyerjük. Ezen tekercs által keltett nagyfrekvenciás mező a fémekben nagyfrekvenciás, azaz nagyvesztésű örvényáramokat eredményez. Az energiaelvonás következtében a rezgés amplitúdója csökken, vagy teljesen meg is szűnhet túl közeli nagy fémdarab esetén. Ezt a csökkenő amplitúdójú rezgést általában egy kéttranzistoros trigger jellegű erősítő érzékeli, és LED-et kapcsol be. [1]

## 4. Saját fémkereső működése

### 4.1. Elméleti háttér

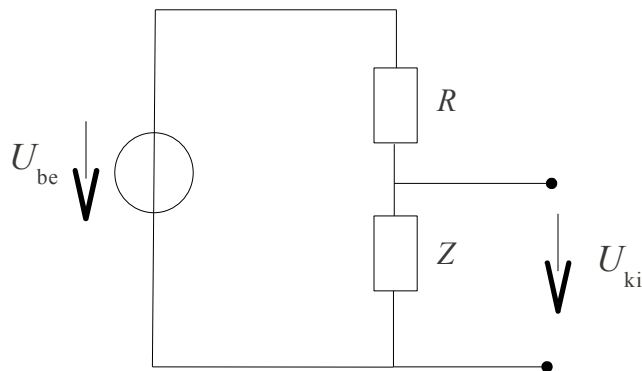
#### 4.1.1. Fémedtektálás elméleti háttére

Fémkereső építésekor a fémek más anyagoktól lényegesen eltérő tulajdonságait használjuk ki. Két ilyen tulajdonságuk van:

- jó elektromos vezetők
- egyes fémek ferromágnesesek

Mindkét tulajdonság a 2. fejezetben ismertetett módon érzékelhető változást hoz létre egy gerjesztett tekercs mágneses terében. Az általam létrehozott eszközben a kereső tekercs komplex impedanciájának a megváltozásából próbálok következtetéseket levonni a szenzor közelében található fémtárgy közelségéről és típusáról. Mivel a tekercs közelébe kerülő fémtárgy megváltoztatja annak mágneses terét, így ez a gerjesztés szempontjából úgy tűnik, hogy megváltozott a tekercs impedanciája. A tekercs mágneses terének gyengülése és növekedése az induktivitás megváltozását okozza, míg a fémtárgyban keletkező veszteségek (örvényáramú vagy hiszterézis veszteség) a tekercs soros ellenállásának megváltozásával modellezhető.

Az impedanciaváltozás hatásának mérése jelfeldolgozó processzor segítségével történik, amelyen lehetőség nyílik a tekercs impedanciaváltozását kiértékelni, mind a változás fázisát, mind nagyságát. A mérési módszer az impedanciamérés során alkalmazott klasszikus megoldás, melyben egy  $R$  kimenőellenállású jelgenerátorral gerjesztőjelet adunk a mérendő  $Z$  impedanciára, és az  $R$  valamint  $Z$  impedanciák által alkotott feszültségosztó kimenőfeszültségét mérjük. Az elrendezés a 4.1 ábrán látható.



ábra 4.1: Impedancia mérésére szolgáló elrendezés

A konkrét megvalósításban a jelgenerátor egy jelfeldolgozó kártyán található digitális-analóg átalakítója szolgál jelgenerátorként, valamint a kártya kimenőellenállása és a jelútban elhelyezkedő multiplexer ellenállása (lásd 4.7 ábra) szolgál generátorellenállásként.

Ha a szenzor jelét a jelprocesszor bemenetére kötjük, akkor tulajdonképpen egy feszültségosztót képeztünk, amelynek alsó tagja maga a szenzor, felső tagja a jelprocesszor kimenetének kimeneti ellenállása (a processzor adatlapja szerint  $600 \Omega$ ) és a multiplexer ellenállása (az adatlapja [5] alapján  $40 \Omega$ ), azaz  $640 \Omega$ . A DSP-n futó programmal megfigyelhető a szenzor komplex impedanciájának változása, amelyből következtetéseket vonhatunk le a fém típusára és távolságára vonatkozóan.

Lássuk, hogyan érdemes megválasztani a szenzor impedanciáját, hogy a maximális érzékenységet érjük el.

Jelöljük a szenzor komplex impedanciáját  $Z$ -vel, a jelprocesszor kimeneti ellenállását pedig  $R$ -rel.

A visszaolvasott jel nagysága a feszültségosztó miatt  $f(Z) = \frac{Z}{R+Z}$  -vel lesz arányos:

$$U_{ki} = U_{be} f(Z) = U_{be} \frac{Z}{R+Z}$$

Az  $U_{ki}$  feszültségnek a  $Z$  változására vonatkoztatott érzékenységét szeretnénk a lehető legnagyobbra beállítani. Ez azt jelenti, hogy venni kell a  $Z$  szerinti deriváltját, és annak a maximuma lesz a legnagyobb érzékenység. A függvény  $Z$  szerinti deriváltjával gyakorlatilag a függvény Taylor-soros közelítését számítjuk ki egy adott  $Z$  impedancia kis  $\Delta Z$  környezetében, mely lehetővé teszi annak számítását, hogy a  $Z$  impedancia kis változása milyen  $\Delta U_{ki}$  megváltozást okoz a feszültségosztó kimenetén. Tehát



$$U_{ki}(Z + \Delta Z) = U_{ki}(Z) + f'(Z)\Delta Z$$

amely segítségével kifejezhető a kimenet megváltozása

$$\Delta U_{ki} = U_{ki}(Z + \Delta Z) - U_{ki}(Z) = f'(Z)\Delta Z$$

$f(Z)$  függvénynek a  $Z$  szerinti deriváltja  $f'(Z) = \frac{R}{R^2 + 2RZ + Z^2}$ . Az  $f'(Z)$ , tehát az

érzékenység akkor maximális, ha  $Z=0$ . Ez a kritérium teljesíthetetlen, viszont  $Z$  értéke egy megoldással minimálisra csökkenthető. Ha a keresőtekerccs mellé teszünk egy kapacitást sorosan, és a soros LC tag rezonanciafrekvenciáján gerjesztjük, akkor elértük, hogy a  $Z$  tag impedanciája minimális legyen. Mivel a kapacitás impedanciája negatív képzetes részű, az induktivitásé viszont pozitív, így a tekerccsel sorosan kapcsolt kapacitással az impedancia képzetes része kiejthető, így csupán a tekerccs soros ellenállása képviseli a tekerccs impedanciáját, mely a konkrét megvalósított eszközben  $10 \Omega$  körüli érték. Ezért tettem minden szenzor mellé egy kondenzátort.

A készülék tervezése során több kísérletet végeztem a keresőtekerccsben használt alkatrészek minél kedvezőbb megválasztása érdekében. A kísérletek során több frekvencián többfajta induktivitást leteszteltem, melynek mérete és értéke tág tartományban változtak. A kísérletek eredményeként a következő alkatrészeket és gerjesztési frekvenciákat választottam:

- 10 mH gyári tekerccs
- 100 nF gyári fóliakondenzátor
- 8-9 kHz rezonanciafrekvenciák a 8 szenzorra (mindre más). Bár a  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  képletből és a névleges értékek alapján 5033 Hz adódik rezonanciafrekvenciára, ennek ellenére mégsem ezt a frekvenciát állítottam be a szenzorok gerjesztésére. Inkább azt a módszert követtem, hogy minden szenzort (LC-tagot) külön megvizsgáltam hálózatanalizátorral (lásd 4.4 ábra), és az eszerinti rezonanciafrekvenciát állítottam be külön minden szenzornak. Ezek 8-9kHz körüli értékek lettek.

A rezonanciafrekvencia tehát nem a kiszámolt értékre jön ki, valószínűleg a parazita jelenségek, vagy egyéb fizikai kialakításból adódó hatások miatt, hiszen nem ideális induktivitásról és kapacitásról van szó. Egy korábbi mérés is ezt bizonyítja, amely értékei a 4.2 ábrán láthatók táblázatosan. Ez még egy korábbi LC páros, tehát nem a végleges, az azonban igaz, hogy a számított

rezonanciafrekvenciájuk 8706 Hz-re jött ki, mégis a legnagyobb válaszjel változást valahol 11.25 kHz-nél mértem. A kísérlet során egy, a keresőtekercestől körülbelül 2 cm-re elhelyezett fémtárgy esetén a 4.1 ábrán látható feszültségosztó kimeneti feszültségének megváltozását mértük az alapállapothoz képest (pontosabban a megváltozás amplitúdóját:  $|\Delta U_{ki}|$  ). A táblázatban feltüntetett értékek belső változók, közvetlenül nem egyeznek meg a feszültségváltozással, de az oszcilloszkópon látottak alapján körülbelül mV nagyságrendű megváltozást jelölnek.

A táblázat alapján levonhatjuk azt a következtetést is, hogy a gerjesztőjel frekvenciájának megfelelő megválasztásával növelhető az érzékenység.

kHz->	1	2	4
mért érték	3.0559006E-006	5.51826E-006	1.420609E-005
kHz->	8	8.706	10
mért érték	0.00012549173	0.00016624383	0.00016752619
kHz->	11	11.25	11.5
mért érték	0.00018581003	0.00019043556	0.00019017539
kHz->	11.75	12	14
mért érték	0.00018789837	0.00018034001	0.00015762156
kHz->	16	32	
mért érték	0.00013973788	4.3973076E-005	

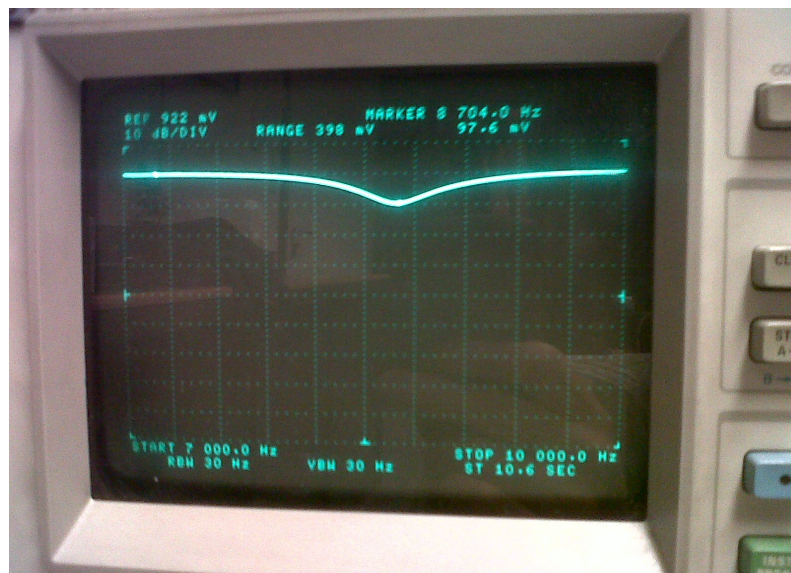
ábra 4.2: Érzékenység frekvenciafüggvénye LC szenzor esetén

Méréseket végeztem annak ellenőrzésére is, hogy a tekercsekkel sorosan kapcsolt kondenzátor hogyan változtatja meg az érzékenységet. Kb. 2 cm-es távolságból méréseket végeztünk pusztán keresőtekerccsel illetve kondenzátorral kiegészítve. Látható, hogy a kondenzátorral kiegészített és 8.709kHz-es rezonanciafrekvencián üzemeltetett mérőfej esetében az adott távolságra elhelyezett fém körülbelül 1.8-szor akkora eltérést okozott mint az önmagában használt mérőfej bármely más frekvencián. Ez a mérés alátámasztja, hogy a kondenzátorral kiegészített mérőfej érzékenysége nagyobb, mint az egyszerű mérőfej érzékenysége.

kHz->	1	2	4	8
L	4.0567938E-005	4.6385932E-005	6.7505694E-005	8.8511108E-005
LC	3.0559006E-006	5.51826E-006	1.420609E-005	0.00012549173
kHz->	8.706	16	32	
L	9.1912858E-005	9.1531081E-005	5.7044996E-005	
LC	0.00016624383	0.00013973788	4.3973076E-005	

ábra 4.3: érzékenység összehasonlítása L és LC szenzornál

A 4.4-es ábra a rezonanciafrekvencia mérésekor készült. A mérés során a kérdéses szenzorra egy hálózatanalizátor segítségével sweepelő szinuszjelet kapcsoltunk. A hálózatanalizátor 50 Ω-os kimenőellenállása, valamint a szenzorként használt LC-tag a 4.1 ábrához hasonló módon feszültségosztót alkotnak. A szenzor impedanciája a rezonanciafrekvencián a legkisebb, így a feszültségosztó kimenőfeszültsége is itt veszi fel minimumát. A minimumhoz tartozó frekvencia adja a rezonanciafrekvenciát.



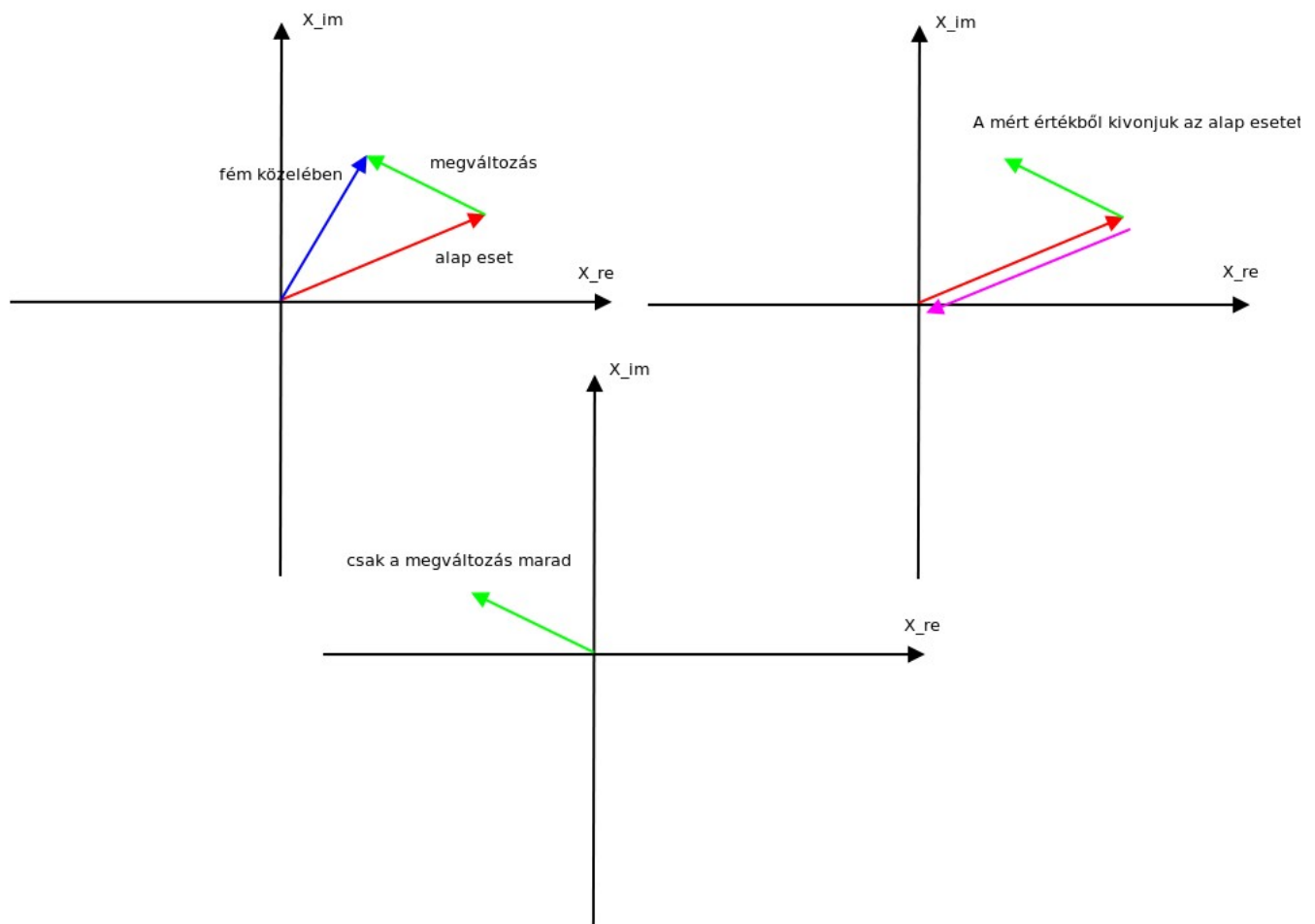
ábra 4.4: Szenzor rezonanciafrekvenciájának meghatározása hálózatanalizátorral

Az eddig leírtak alapján a fémdetektor működtetése a következő fázisokat tartalmazza:

1. Bekapcsolást követően egy semleges területen megmérjük és eltároljuk a szenzor kimenőjelét (offsetmérés):  $U_{ki}(Z)$  mérése
2. Az offsetmérést követően a további mérési eredményeket az offsettel korrigáljuk (4.5 ábra):  $\Delta U_{ki} = U_{ki}(Z + \Delta Z) - U_{ki}(Z)$

Tapasztalat szerint az offsetkorrekciót bizonyos időközönként újra el kell végezni, mert elcsúszik a nullapont. Ennek oka lehet a szenzor, illetve a kapcsolódó elektronika paramétereinek megváltozása.

A 4.5 ábrán látható fazorok mérésére az ún. Rezonátoros megfigyelő algoritmust alkalmaztam, melyet a 4.1.2. alfejezetben mutatok be.



ábra 4.5: Mért értékek értelmezése

A fentiekben vázolt fémdetektálásra használt algoritmus a VLF keresőkhöz hasonlít leginkább, azonban a jelfeldolgozó processzor sajátosságait is figyelembe vettem a módszer kidolgozása során. Az általam ajánlott módszer szerint a keresőtekerces megegyezik a gerjesztőtekerccsel, mivel minél egyszerűbb felépítésre törekedtem. Habár a 3. fejezetben vázolt módszerek közül közvetlenül egyiket sem használtam fel, azonban az ott bemutatott alapötletek jó kiindulási alapot szolgáltattak a saját algoritmus kidolgozásában.

#### 4.1.2. Rezonátoros megfigyelő algoritmus elméleti háttere

Ebben az alfejezetben a szenzorok szinuszos gerjesztés hatására létrejövő kimenőjelét feldolgozó algoritmust ismertetem.

A rezonátoros megfigyelő egy olyan, digitális jelfeldolgozásban használt iteratív algoritmus, amellyel egy mintavételezett jel Fourier-együtthatóira becslést lehet adni [9][10]. A megfigyelő szó az algoritmus alap gondolatából ered: egy periodikus jel felfogható úgy, mint egy lineáris rendszer kimenő jele, melynek állapotváltozói megfelelnek a jel Fourier-együtthatóinak. Az együtthatók tehát egy megfelelően megtervezett állapotmegfigyelővel mérhetőek. A működés rövid magyarázata a fejezet témája.

A periodikus jelek felírhatók a következő alakban az  $X_k$  -val jelölt Fourier-együtthatóikkal:

$$y_n = \sum_{k=-N}^N X_k c_{k,n}$$

ahol

$$c_{k,n} = e^{j2\pi(f_1 k)n} ; \quad k = -N \dots N$$

függvények jelölik a Fourier-felbontás alapjául szolgáló komplex exponenciális bázisfüggvényeket.

$f_1$  az alapharmonikus frekvenciáját jelenti a mintavételi frekvenciához képest. Így az  $f_1 k$  szorzat a  $k$ -adik harmonikus frekvenciaösszetevőt jelenti.  $n$  az időindexet jelölő változó. Az  $X_k$  Fourier-együttható egy komplex szám, melynek hossza az adott szinuszos komponens amplitúdóját, fázisa pedig az adott szinuszos komponens fázisát adja meg.

Az  $X_k$  komponenseket mérő rezonátoros megfigyelő blokkdiagramja az 4.6 ábrán látható. Az algoritmus a következő egyenletekkel írható le:

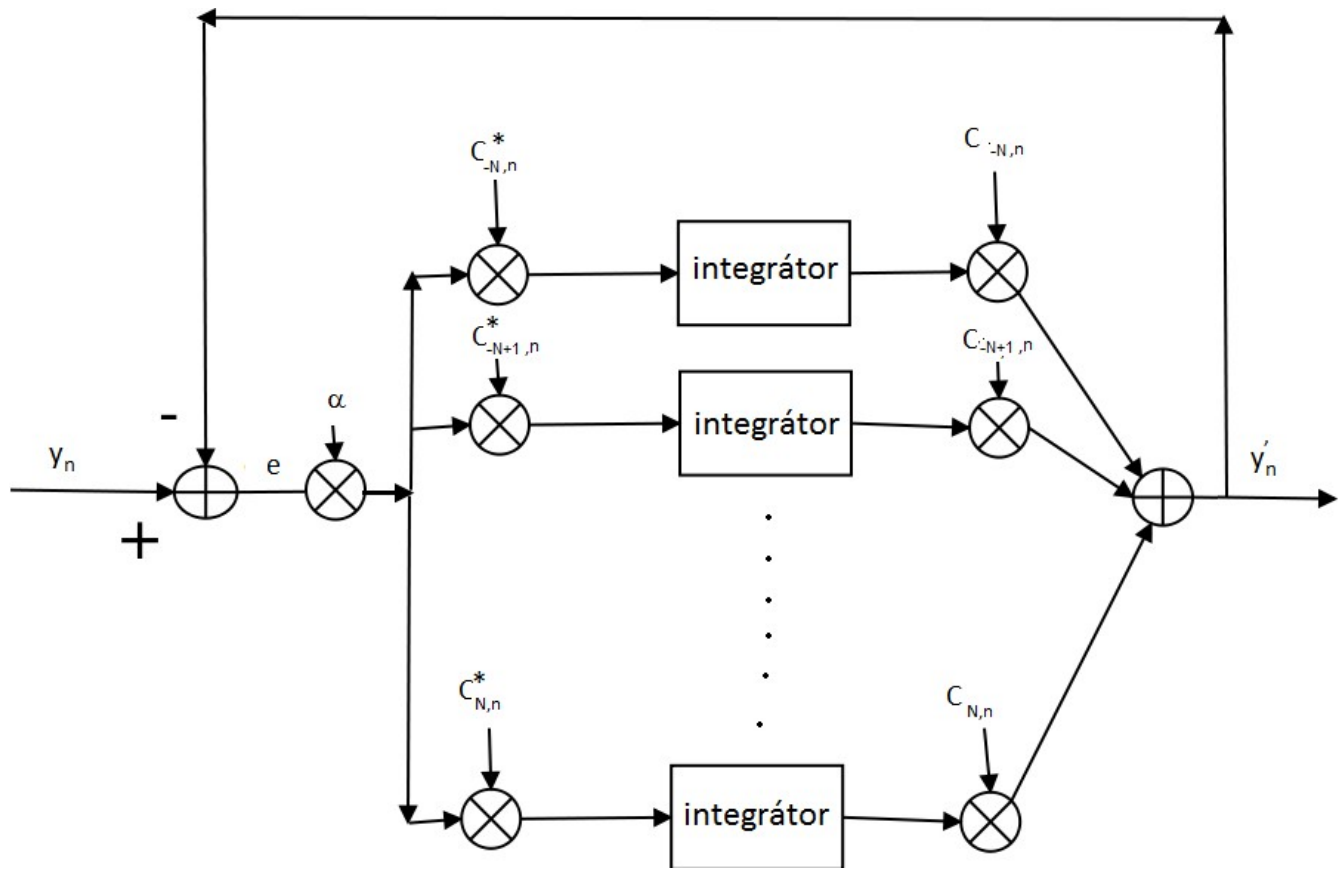
$$y'_n = \sum_{k=-N}^N X'_{k,n} c_{k,n}$$

$$X'_{k,n+1} = X'_{k,n} + \alpha c_{k,n}^* (y_n - y'_n)$$

Az egyenletekben  $X'_{k,n}$  jelöli a  $k$ -edik harmonikus komponens becült Fourier-együtthatóját az  $n$ -edik mintavételi ütemben.  $*$  A komplex konjugálást jelöli.

A megfigyelő úgynevezett rezonátorcsatornákból épül fel. Ezek a csatornák a 4.6 blokkdiagramon látható párhuzamos jelutak, melyek tartalmaznak egy  $c_{k,n}^*$ -nel való szorzást, egy integrálást, majd egy  $c_{k,n}$ -nel való szorzást. Belátható, hogy egy ilyen csatorna erősítése végtelen a hozzá tartozó frekvencián; innen ered a rezonátor elnevezés. Szintén belátható, hogy a negatívan visszacsatolt rezonátornak köszönhetően a megfigyelő hiba nélkül képes előállítani a Fourier-együtthatókat ideális esetben [9][10].

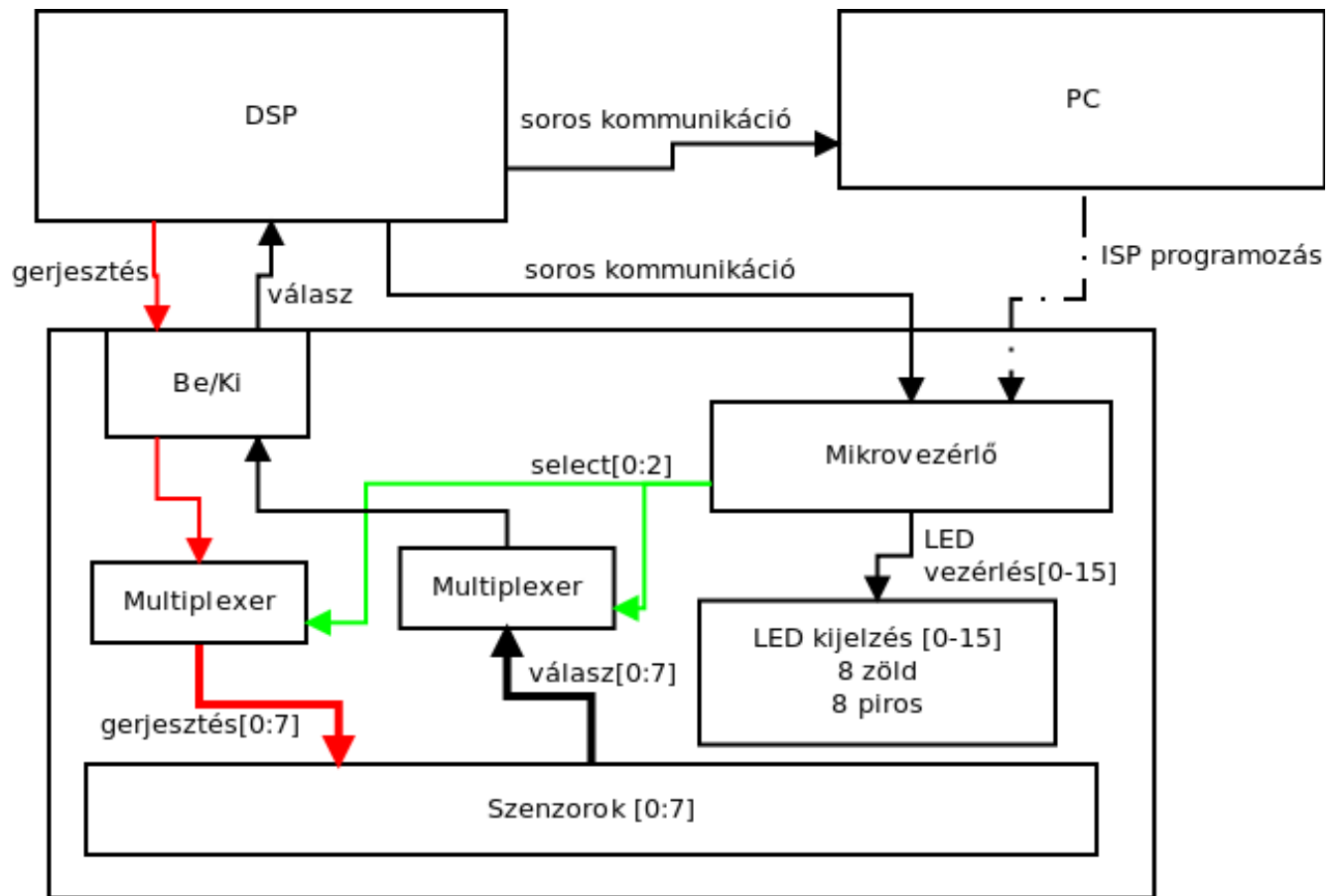
A megfigyelő annyiszor kettő csatornából áll, ahány frekvenciakomponenst tartalmaz a megfigyelt jel ( $y_n$ ). Ennek oka az, hogy egy valós szinuszos komponens előállításához két darab komplex exponenciális függvény összegeként áll elő, melyek egymás komplex konjugáltjai, és azonos amplitúdóval rendelkeznek. A Fourier-együttható becült értékére, azaz  $X'_{k,n}$ -re, a továbbiakban úgy hivatkozunk, mint a mért értékre (pontosabban ennek megváltozása lesz a mért érték, lásd 4.5 ábra), és ezen komplex szám megváltozásának a szögéből és nagyságából fogunk levonni következtetéseket a fém típusára és távolságára vonatkozóan. Az  $\alpha$  paraméter egy  $(0..1)$  intervallumba eső szám, a rezonátor beállításának gyorsaságát módosítja. Minél kisebb  $\alpha$  értéke, annál lassabb a megfigyelő beállása, viszont zajelnyomó képessége javul [9][10]. Mivel a megtervezett rendszerben igen kis megváltozásokat (mV nagyságrendű) kell mérni, így az algoritmus által kínált zajelnyomó képesség nagy előnyt jelent a mérés során keletkező zavarok miatt.



ábra 4.6: Rezonátoros megfigyelő blokkdiagramja

## 4.2. Rendszerterv

A megépített többszenzoros fémdetektor sematikus felépítése a 4.7 ábrán látható. Ebben a fejezetben az egyes részegységek feladatának specifikálása, és a rendszer működésének magyarázata található.



ábra 4.7: Rendszerterv logikai blokkdiagramja

A keresőfejen 8 szenzor helyezkedik el, ezért ennyi gerjesztőjelet kellene kiadni a DSP-nek, és ugyanennyit feldolgozni párhuzamosan. Ez több szempontból nem lehetséges:

- Egyértelmű korlát a DSP kártya ki- és bemeneteinek száma. A kártyán 8 darab kimenet, viszont csupán 2 db bemenet található. Ez nem elegendő 8 szenzor független gerjesztésére, és a válaszjelek kiértékelésére.
- A fogyasztás is növekszik a szenzorok számának növekedésével.



A megfelelő számú független ki- és bemenet hiányában a megvalósított rendszerben a szenzorok kezelése időmultiplex módon történik, tehát a teljes időt "időszeletekre" bontjuk, és minden szenzor kap egy időszeletet. A DSP szemszögéből tehát ugyanúgy egy kimeneten kell a gerjesztőjelet kiadni, és egy bemeneten visszaolvasni. A gerjesztőjel egy meghatározott ideig az egyik szenzort gerjeszti, majd ha letelt az időszelet, akkor átvált a következőre. Ha a nyolcadik szenzor ideje is lejárt, akkor ismét az első kap időt. Ezt analóg multiplexer/demultiplexer párral oldottam meg, amelyek vezérlőjele/kiválasztójele közösítve van.

A fémdetektorban az eredmények megjelenítése kétféle módon lehetséges:

- PC-s megjelenítés, mely egy teljes felület szkennelését követően rajzolja ki a mérés eredményét.
- Szenzoronként egy piros és zöld LED a pillanatnyi mérési eredmény megjelenítésére.

A LED-ek fényerejét a fém által okozott feszültségváltozás határozza meg, míg a feszültségváltozás szöge alapján történik a szín megválasztása. A LED-eket a kis számú digitális általános kimenete miatt nem képes a DSP meghajtani, emiatt mindenképpen kell a keresőfejre valamilyen mikrovezérlő, amely elláthatja a következő feladatokat:

- Elegendő általános kimenete van a 16 db LED meghajtásához
- Van még szükség 3 kimenetre a multiplexer/demultiplexer (továbbiakban csak multiplexer páros) vezérlőbemenetének meghajtásához.

A felhasznált mikrovezérlő soros porton keresztül kap információt a DSP-től a multiplexerek és LED-ek vezérlésével kapcsolatban.

A jelfeldolgozó processzor minden időszeletben az adott szenzorra jellemző rezonanciafrekvenciájával egyező szinuszjelet ad ki. A 4.1.1 alfejezetben ismertetett elvek alapján a keresőtekeres és a kiegészítő kondenzátor közös rezonanciafrekvenciájának közelében várhatjuk a legnagyobb érzékenységet.

Az időszeletek elején a DSP elküldi azt az információt a mikrokontrollernek (soros kommunikáción keresztül), hogy éppen mely szenzornak szánja a gerjesztést. Ez egy 3 bites szám, amely 0-7 értékű lehet, és a mikrokontroller ez alapján vezérli a multiplexereket, így alakul ki a select[0:2] jel. A szenzorokról a válaszjel egy másik multiplexeren keresztül tér vissza a

jelprocesszorba.

A multiplexer select információját tartalmazó csomagban a jelfeldolgozó processzor elküdi az előző ciklusból származó, a mért értékekkel arányos LED kitöltési tényezőket is. Ezt a mikrovezérlő fogadja, és ezek alapján szoftveres PWM útján meghajtja a LED-eket. Így jön létre a LED vezérlés[0:15] jel.

A jelprocesszor a PC felé is elküldi a mért értékeit, amely alapján a PC-n működő adatgyűjtő szoftver kijelzi a fém alakját és típusát.

Ezen felül a PC-felől a mikrokontroller ISP programozható (In System Programmable), amely azt jelenti, hogy a mikrokontroller már a rendszer részeként, annak SPI interfészét felhasználva külső eszköztől programozható; jelen esetben PC-ről.

Összefoglalva tehát a rendszerben a következő részegységek találhatók:

1. Jelfeldolgozó processzor (DSP), mely a következő feladatokat látja el:
  - a. Időszakok meghatározása [0-7] / multiplexerek vezérlőjelének előállítása [0-7]
  - b. Gerjesztőjel kiadása a szenzorok számára
  - c. Válaszjel kiértékelő rezonátoros megfigyelő algoritmus
  - d. Kommunikáció a PC-vel
  - e. Vezérlő parancsokküldése soros porton a szenzor kártyán található mikrokontrollernek

A jelfeldolgozó processzor egy Analog Devices által gyártott fejlesztői kártyán található.

Részletesebb bemutatása az 5.1. fejezetben olvasható.

2. Keresőfej: Ez az általam készített egység, ezen helyezkednek el a keresőszenzorok, a kijelzést és multiplexerek vezérlését ellátó mikrovezérlő, valamint minden egyéb kiegészítő logikai blokk.
  - a. Mikrovezérlő: A vezérlő feladata, hogy a jelprocesszortól kapott csomagok alapján kiadja a multiplexerek vezérlőjelét (az 4.7 ábrán select[0:2]), és a szenzorok kijelző LED-jeit (8 piros és 8 zöld) szoftveres PWM-mel a megfelelő kitöltési tényezővel vezérelje.
  - b. Multiplexerek: Ezek select[0:2] jelét a mikrovezérlő generálja. Ezen eszközök kapcsolják rá

- a jelprocesszor gerjesztőjelét a megfelelő szenzorra, illetve ugyanezen szenzor válaszjelét teszi ki a demultiplexer a jelprocesszor felé.
- c. Szenzorok: Ezek passzív eszközök, amelyek mindegyike a gerjesztést a jelprocesszortól kapja (miután az áthaladt egy multiplexeren). A róluk visszaolvasott válaszjel egy másik multiplexeren keresztül szintén visszaérkezik a jelfeldolgozó processzorba.
  - d. LED kijelzés: Ez a blokk 16 LEDből áll. 8 piros és 8 zöld színűből. Ezen LED-ek a mikrokontrollertől kapják a vezérlést.
3. PC: Ez a blokk a jelfeldolgozó processzor fémmel kapcsolatos információit fogadja soros kommunikáción keresztül (fázistolás, válaszjel erőssége), és vizuálisan megjeleníti.

## 5. Felhasznált eszközök

### 5.1. Jelfeldolgozó processzor



*ábra 5.1: A DSP-t tartalmazó fejlesztői kártya*

A jelfeldolgozó processzor legfontosabb adatai a következők:

1. 32 bites (40 bit kiterjesztett pontosság) architektúra
2. lebegőpontos aritmetika
3. 3 Mbit SRAM
4. 330 MHz órajel
5. külön I/O processzor
6. SIMD (single instruction multiple data) támogatás
7. perifériák:
  1. JTAG
  2. párhuzamos port

3. soros port
4. SPI port
5. DAI port (Digital Audio Interface)
8. 22 DMA csatorna kezelése egyidejűleg perifériák és belső SRAM memória között

A processzor egy általános célú fejlesztői kártyán helyezkedik el. A kártya tartalmazza a programozáshoz szükséges JTAG interfészt és az analóg illesztő áramköröket. Az AD és DA átalakítás AD1835 típusú codec segítségével történik, mely egy sztereo be- és négy sztereo kimeneti csatornával rendelkezik. Teljes funkcionalitással 96 kHz-es mintavételi frekvenciát képes biztosítani.

A fejlesztői kártyához csatlakoztatható kommunikációs áramkör segítségével képes szabványos RS232-es UART kommunikációra.

## 5.2. Mikrovezérlő

Az általam választott mikrovezérlő típusa az Atmel cég által gyártott ATMEGA32, mely a következő lényeges paraméterekkel rendelkezik:

1. 8 bites, RISC architektúra
2. 32 Kbyte flash program memória
3. 1024 Byte EEPROM
4. 2 Kbyte belső SRAM
5. Írási/törlési ciklusok maximális száma:
  - a. Flash: 10 000
  - b. EEPROM: 100 000
6. Perifériák:
  - a. 2 db 8 bites és 1 db 16 bites timer
  - b. I2C interfész
  - c. Programozható USART
  - d. Master/Slave SPI interfész

7. 32 darab programozható általános ki/bemenet
8. 40 lábás PDIP tokozás
9. Órajel lehetőség: 0-8 MHz

A mikrokontroller választásának egyik fő szempontja, hogy ezzel a mikrokontrollerrel voltak korábbi tapasztalataim, amely a fejlesztési idő szempontjából fontos. A mikrovezérlő megfelelő perifériakészlettel rendelkezik a feladat végrehajtásához: van elegendő általános ki/bemenete, amely a 16 LED, 3 select, továbbá a hibakeresést segítő 1 nyomógomb és 2 LED meghajtásához szükséges. Található a mikrokontrolleren UART egység, mely a DSP-vel való kapcsolat kiépítéséhez használható. Fontos szempont volt még, hogy ezen mikrokontroller ISP (In System Programmable) programozható, amely megkönnyíti a fejlesztést, hiszen ez azt jelenti, hogy a mikrokontroller már a rendszer részeként, annak SPI interfészét felhasználva külső eszközzel programozható. [3]

### 5.3. Szenzorok

Az általam készített eszközben 8 egymáshoz képest rögzített helyzetű, egy vonalban elhelyezkedő szenzor szerepel. Ezen kialakítást az indokolja, hogy a szakdolgozat egyik célja az volt, hogy a fém alakjáról és típusáról képet tudjunk alkotni, amelyből a megfelelő következtetéseket le lehet vonni. Az egymás mellé elhelyezett szenzorok teszik lehetővé, hogy a szenzor manuális, oldalirányú mozgatása nélkül, csupán elektronikus kapcsolók segítségével lehessen gyorsan pásztázni a megadott felületen. A szenzorok hosszirányú mozgatását természetesen manuálisan kell megoldani, de még így is csökkenthető egy adott felületű terület letapogatásához felhasználandó idő.

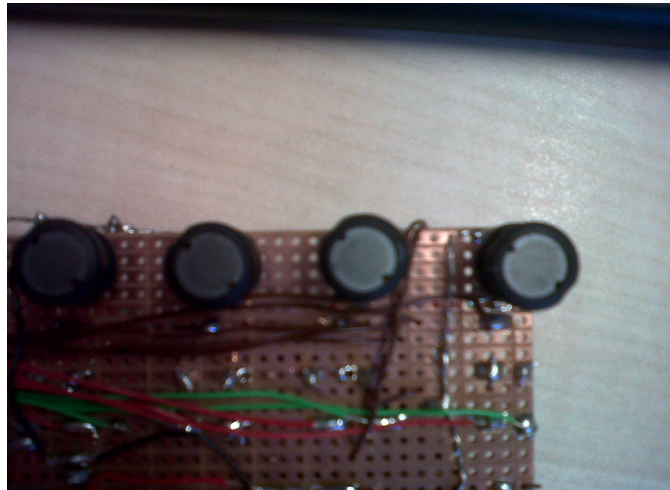
A szenzorok egymáshoz képesti távolságának szempontjai a következők voltak:

- A szenzorok ne legyenek túl közel egymáshoz, hogy ne befolyásolják egymás működését
- Ne legyenek túl messze egymástól, hogy ne legyen kihagyott terület a letapogatás során

A konkrét megvalósításban a szenzortekercsek körülbelül 2 cm-re helyezkednek el egymáshoz képest, mely tapasztalatok szerint jól kielégíti a fenti feltételeket.

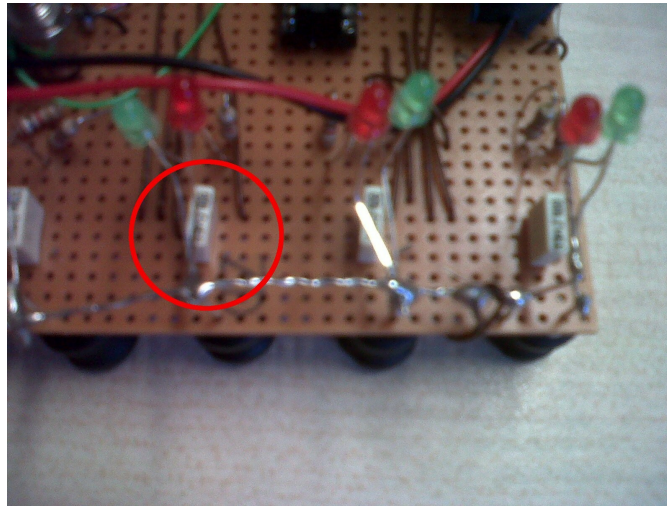
Minden szenzor egy gyárilag elkészített 10 mH induktivitásból és 100 nF-os fóliakondenzátorból áll.

Az induktivitások azért gyári eszközök, mert így biztosítható a minimális értékbeli szórás, valamint a kis helyigény. Szigorú értelemben véve az induktivitás a szenzor, a kondenzátor csak arra szolgál, hogy az LC tag impedanciáját minimálissá tegye, ez ugyanis javítja az érzékenységet (ld. 4.1.1). A 5.2 ábra egy kép az induktivitásokról.



ábra 5.2: A szenzorok induktivitásai

A szenzorokban alkalmazott kondenzátorok fóliakondenzátorok, mert ezek értéke stabil. Tervezés során többfajta kondenzátortípust is megvizsgáltam, például kerámiakondenzátort, azonban ezek hátránya, hogy a gerjesztőjel rákapcsolása után percek múlva sem stabilizálódott a kapacitásuk, akár több százalékot is változott másodpercek alatt. Ez megengedhetetlen jelen esetben, hiszen az impedancia változása miatt a válaszjel is folyamatosan változik, és a DSP úgy fogja értékelni, mintha valamilyen fém került volna a szenzor közelébe. Az 5.3 ábrán a kapacitások a LED-ek alatt helyezkednek el.



ábra 5.3: A szenzorok kondenzátorai

A jelenlegi konstrukcióban a szenzortömb szélessége körülbelül 20 cm, tehát ekkora szélességű felület tapogatható le egy mérés során a keresőfej oldalirányú elmozdítása nélkül. Azokban a gyakorlati alkalmazásokban, ahol ez nem elégíti ki az igényeket, két megoldás kínálható:

1. Megnöveljük a szenzorok számát
2. Arányosan növeljük a szenzorok méretét a megfelelő méret eléréséig

Természetesen a két megoldás kombinációja is használható. Az 1. megoldás hátránya, hogy nagy terület lefedéséhez nagyon sok szenzor szükséges, viszont kis szenzorok esetén nagy felbontást kapunk. A 2. megoldás esetében a szenzorok száma nem nő, viszont csökken a letapogatás finomsága (felbontása), az ugyanis az alapvetően a keresőtekercesek méretével összemérhető. Minél nagyobb a keresőtekerces, általában annál kisebb felbontást tesz lehetővé. Egy konkrét eszköz építése esetén a fenti szempontok figyelembe vételével lehet megtervezni a szenzortömb felépítését.

Az általam tervezett prototípus eszközben a méretek megválasztásának szempontja az volt, hogy kisméretű tárgyakat megfelelő felbontással lehessen érzékelni, és laboratóriumi körülmények között egyszerűen lehessen tesztelni olyan környezetben is, ahol kisméretű szabad terület áll rendelkezésre a mérések elvégzéséhez.



## 5.4. Egyéb kiegészítők

Ebben a fejezetben a szenzorpanelen található részegységek bemutatása található. Az áramkörök listája tartalmazza az egyes áramkörök fontosabb tulajdonságait, valamint a működéséhez fűződő magyarázatokat. Az áramkörök megválasztásánál törekedtem arra, hogy egyszerűen beszerezhető, költségkímélő alkatrészeket válasszak, melyek kielégítik a rendszer követelményeit.

1. MAX232 IC, 86CEF6M [4]:
  - a. dual EIA-232 Driver/Receiver
  - b. RS232-es szabványban meghatározott jelszinteket állítja elő, vonalmeghajtó áramkör
  - c. legfeljebb 120 kbit/s átvitelre képes
  - d. 5V tápfeszültséget igényel
  - e. Texas instruments gyártó
  
2. 8-1 analóg multiplexer/demultiplexer, CD74HC4051 [5]:
  - a. alacsony áthallás a csatornák között
  - b. nagy váltási sebesség és alacsony terjedési késleltetés
  - c. +5V és -5V tápfeszültséget is igényel, ezek az értékek a bemeneti feszültség korlátai
  - d. Texas instruments gyártó
  
3. L7905CV negatív feszültség stabilizátor IC [6]:
  - a. legfeljebb 1.5A kimeneti áram
  - b. -5V kimeneti feszültség
  - c. ST gyártó

A megvalósított szenzorpanelon az IC bemeneti feszültségét a MAX232 IC VS- lába szolgáltatja, amelyen -8V jelenik meg normál üzemi körülmények között. Az L7905 IC kimeneti feszültsége stabilizált -5V, amely a keresőfej multiplexereit látja el negatív tápfeszültséggel. Más aktív

IC-nek nincs szüksége negatív tápfeszültségre.

Meg kell jegyeznünk, hogy a negatív tápfeszültség előállításának módja nem teljesen szokványos, ugyanis a MAX232-es IC alapvetően nem tápfeszültség előállítására tervezték. Itt csupán azt használjuk ki, hogy az RS232-es negatív jelszintjeinek kiadásához az IC töltéspumpa segítségével negatív tápfeszültséget állít elő. Habár az IC-nek ezen kimenete nem terhelhető nagy árammal, de esetünkben csupán vezérlőjelként használjuk, így nem okoz problémát, és ezen lépéssel megtakarítunk egy negatív feszültséget előállító áramkört.

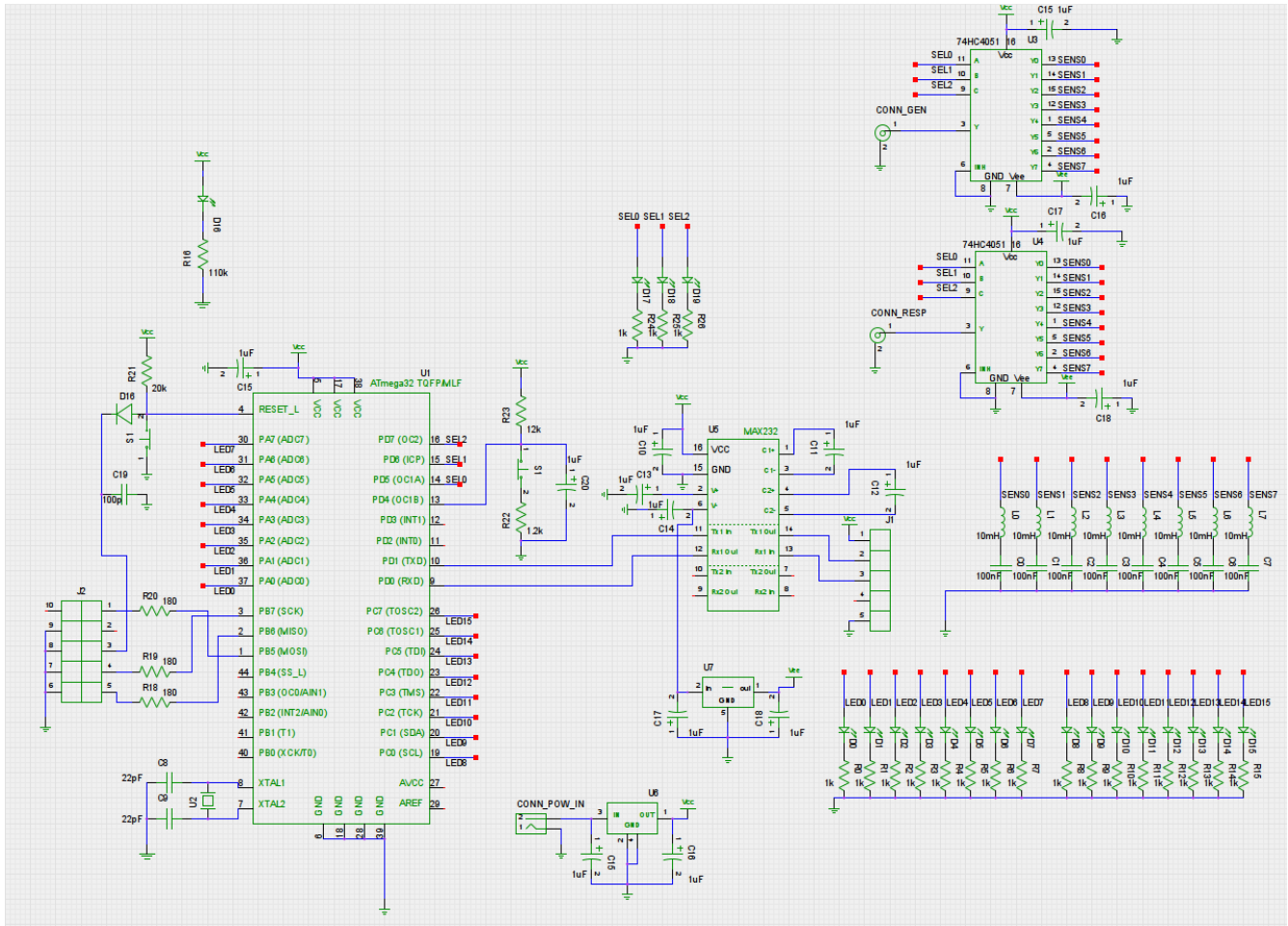
#### 4. L7805CV pozitív feszültség stabilizátor IC [7]:

- a. legfeljebb 1.5 A kimeneti áram
- b. 5 V kimeneti feszültség
- c. ST gyártó

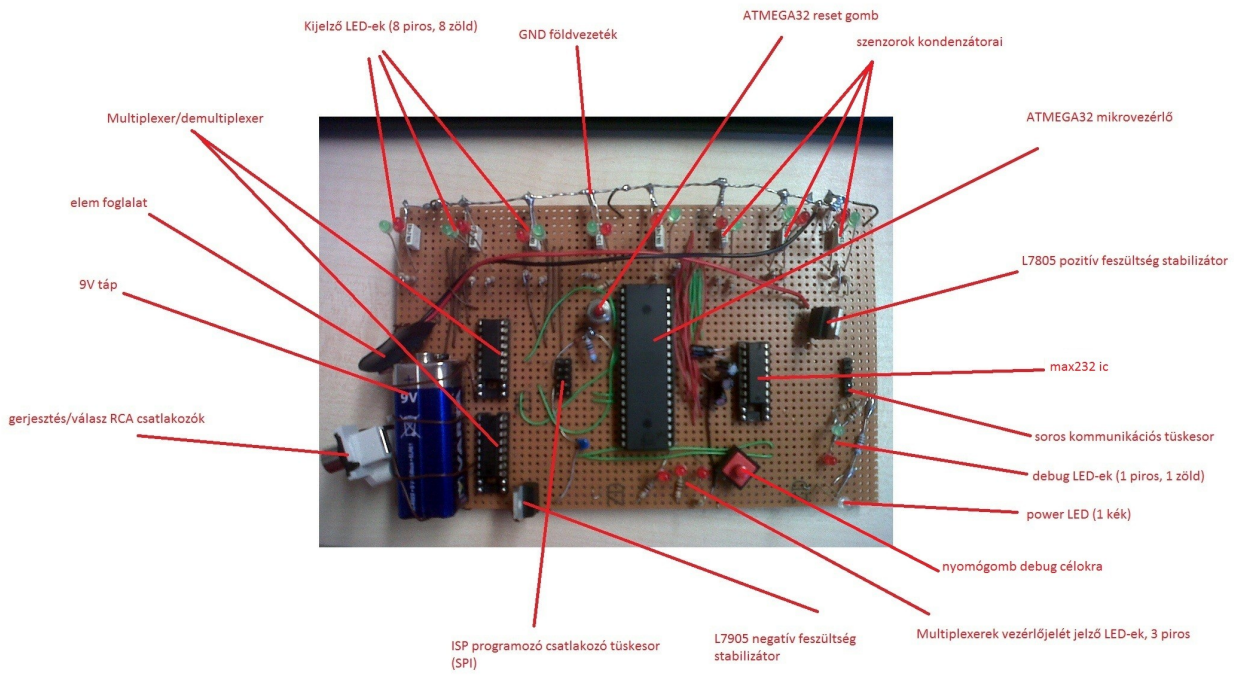
Ez az IC a bemeneti feszültségét egy 9V-os elemről kapja. Az IC kimenete stabilizált 5V, amely az összes keresőfejen levő aktív IC pozitív tápfeszültségét szolgáltatja.

# 6. A szenzorkártya hardveres felépítése

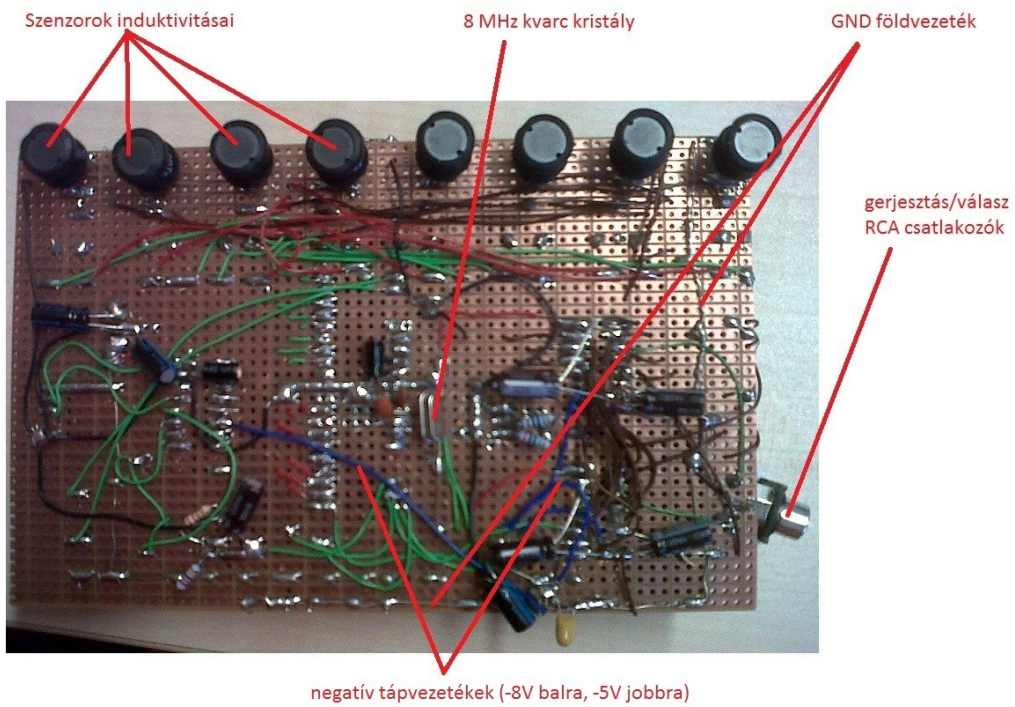
A fémdetektor általam tervezett hardverkomponense az érzékelőtekercseket tartalmazó szenzorkártya (keresőfej). Ebben a fejezetben a kártya felépítése és működése kerül bemutatásra. A 6.1-es ábrán látható a keresőfej kapcsolási rajza, a 6.2-n a keresőfej felülnézeti, a 6.3 ábrán pedig a keresőfej alulnézeti képe.



ábra 6.1: A keresőfej kapcsolási rajza



ábra 6.2: A keresőfej felső oldala



ábra 6.3: A keresőfej alsó oldala

A következő felsorolásban az áramkör fontosabb részegységei, és azok funkcióinak leírása található.

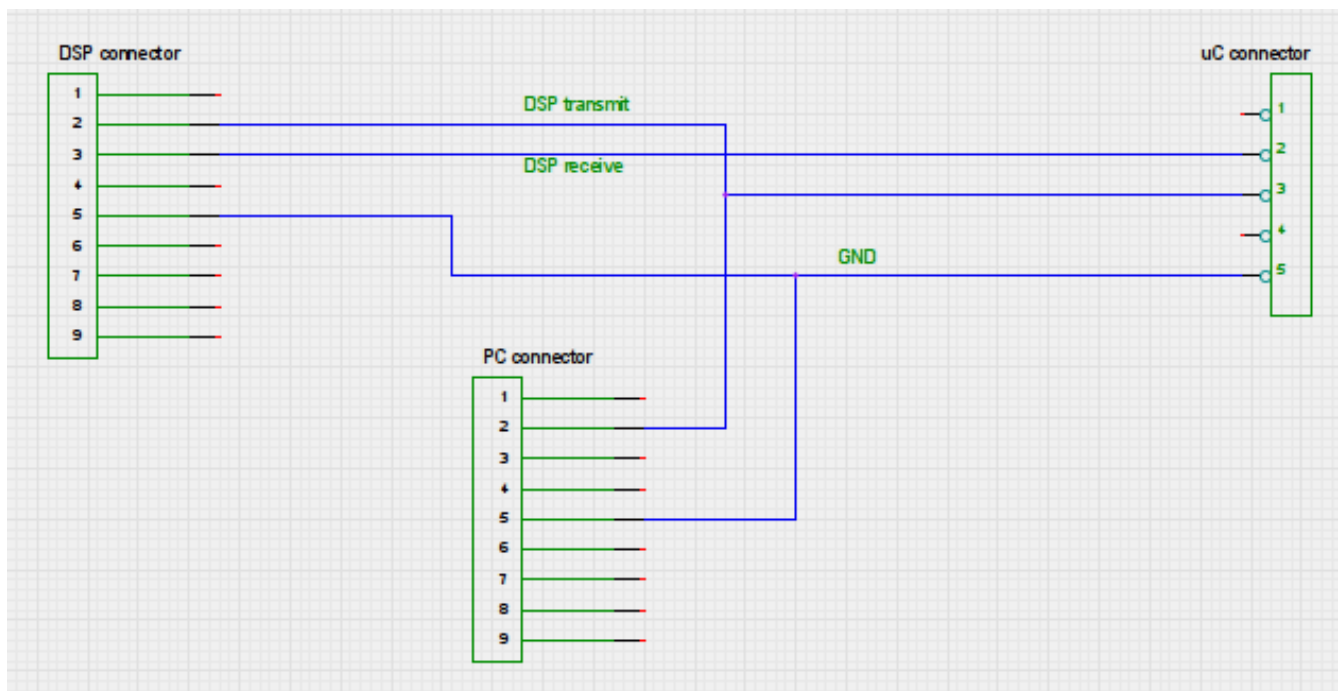
1. ATMEGA32 mikrovezérlő: Ez az egység mondható a keresőfej központi egységének. A következő egységekkel van kapcsolatban:
  - a. kijelző LED-ek vezérlése
  - b. multiplexerek vezérlése / multiplexerek vezérlőjelét jelző LED-ek
  - c. soros kommunikációs túsoros
  - d. ISP programozó csatlakozó túsoros
  - e. nyomógomb debug célokra
  - f. ATMEGA32 reset gomb
  - g. MAX232 IC
  - h. debug LED-ek
  - i. 8 MHz kvarc kristály
  - j. GND vezeték, 5V tápvezeték
2. gerjesztés/válasz, RCA csatlakozók: A piros jelzésű RCA csatlakozóhoz kell a DSP gerjesztőjelét csatlakoztatni, a feketéhez a szenzor válaszjelét.
3. 9V-os elem: Ez adja a bemeneti feszültséget a pozitív feszültség stabilizátor számára, amely előállítja az 5V-os tápfeszültséget. Ez az 5V lesz a keresőfej pozitív tápfeszültsége.
4. Elem foglalat: ebbe lehet bele pattintani a 9V-os elem pólusait.
5. Multiplexer/demultiplexer: Az RCA gerjesztés/válasz csatlakozókra és a szenzorokra vannak kötve ki/bemeneteik. A multiplexerek vezérlőjeleit a mikrokontroller állítja elő a a DSP-től kapott parancsok alapján.
6. Kijelző LED-ek: A zöld/piros LED-párok a szenzorok fölött helyezkednek el, mindegyik LED-pár a hozzá tartozó szenzor fölött. Így látható, hogy alattuk van-e fém. A szenzorok tekercsei az alsó oldalon találhatóak.
7. GND földvezeték: A keresőfej 0 feszültségű vezetéke, amely a túloldalon folytatódik. A

tápvezeték nem ennyire szembetűnő, a 6.2 ábrán nem jeleztem. A +5V-os tápvezeték a pozitív feszültség stabilizátor kimenetére csatlakozik. A piros színű vezetékek a +5V-os és +9V-os tápvezetékek. A fekete színű vezetékek földvezetékek.

8. ATMEGA32 reset gomb: Megnyomásakor a mikrovezérlő alacsony-aktív reset lábát földre húzza, azaz reseteli a mikrokontrollert.
9. Szenzorok kondenzátorai: Ezek azok a fóliakondenzátorok, amelyek minimálisra csökkentik a szenzorok komplex impedanciáját. Ezek névleges értéke 100 nF. A tekercsekkel sorba vannak kapcsolva.
10. L7805 pozitív feszültség stabilizátor: Bemeneti feszültségét a 9V-os elemről kapja, és előállítja a keresőfej 5V-os pozitív tápfeszültségét. Közvetlen kapcsolatban a 9V-os vezetékkel, a GND földvezetékekkel és az 5V-os tápvezetékekkel van.
11. MAX232 IC: Ez az IC egy szintillesztő, amely a TIA/EIA-232-F szabványos feszültség szint (PC által használt) és az 5V-os TTL/CMOS feszültség szint közötti szintillesztést végzi el. Ezen keresztül történik a PC és mikrovezérlő közötti soros kommunikáció a mikrovezérlő programozható USART perifériájának használatával. Közvetlen kapcsolatban van a mikrovezérlővel és a soros kommunikációs tükessel.
12. Debug LED-ek (1 piros, 1 zöld): Ezeknek a LED-eknek a működés szempontjából semmilyen jelentőségük nincs, csak a fejlesztést segítő hibakereső funkciót kapták. A végső verzióban az UART-on érkezett adatok feldolgozását jelzik.
13. Power LED (1 kék): Ha az 5V-os tápfeszültség megjelenik az 5V-os tápvezetékeken, akkor ez a LED kigyullad, ezzel jelezvén, hogy a keresőfej aktív IC-i megkapják a szükséges pozitív tápfeszültséget (és a multiplexerek a negatívát is).
14. Nyomógomb debug célokra: Csak hibakeresésre használtam a mikrovezérlő programjának írásakor. Végső verzióban semmilyen funkciót nem lát el.
15. Multiplexerek vezérlőjelét jelző LED-ek: Binárisan az időszelvény számát jelenítik meg. Ennek hibakereső jelentősége volt a mikrovezérlő programjának írása közben.
16. L7905 negatív feszültség stabilizátor IC: Ez az IC állítja elő a keresőfejen levő multiplexerek negatív tápfeszültségét, -5V-ot. Közvetlen kapcsolatban áll a MAX232 VS- lábával, amely -8V feszültséget ad ki, illetve a GND földvezetékekkel és a -5V-os negatív tápfeszültséggel.

17. ISP programozó csatlakozó tükcesor: A mikrovezérlő ezen keresztül ISP programozható a PC-ről. Közvetlen kapcsolatban van a mikrovezérlő SPI soros perifériájával.
18. Szenzorok induktivitásai: Ezekből 8 darab van, szigorú értelemben véve csak ezek a szenzorok, hiszen ezen eszközök fizikai paramétrei (komplex impedanciája) változik adott gerjesztőjelre nézve, ha fém kerül a közelükbe. Ezek 10 mH induktivitások. Közvetlen kapcsolatban vannak a multiplexerek ki/bemeneteivel.
19. 8 MHz kvarc kristály: A mikrokontrollernek szolgáltat 8 MHz-es frekvenciát a mikrokontroller oszcillátorához kapcsolva.
20. Negatív tápvezeték (-8V ill. -5V): A -8V-os tápfeszültséget a MAX232 IC -VS lába adja ki. Ez a -8V csatlakozik a negatív tápfeszültség stabilizátorra, amely kiadja a -5V-os tápfeszültséget a multiplexerek számára.

A 6.4 és ábrán látható a 3 eszközt kommunikációját biztosító soros kábel kapcsolási rajza.



ábra 6.4: Soros kábel kapcsolási rajza

## 7. A rendszer szoftveres felépítése

### 7.1. Jelfeldolgozó processzor

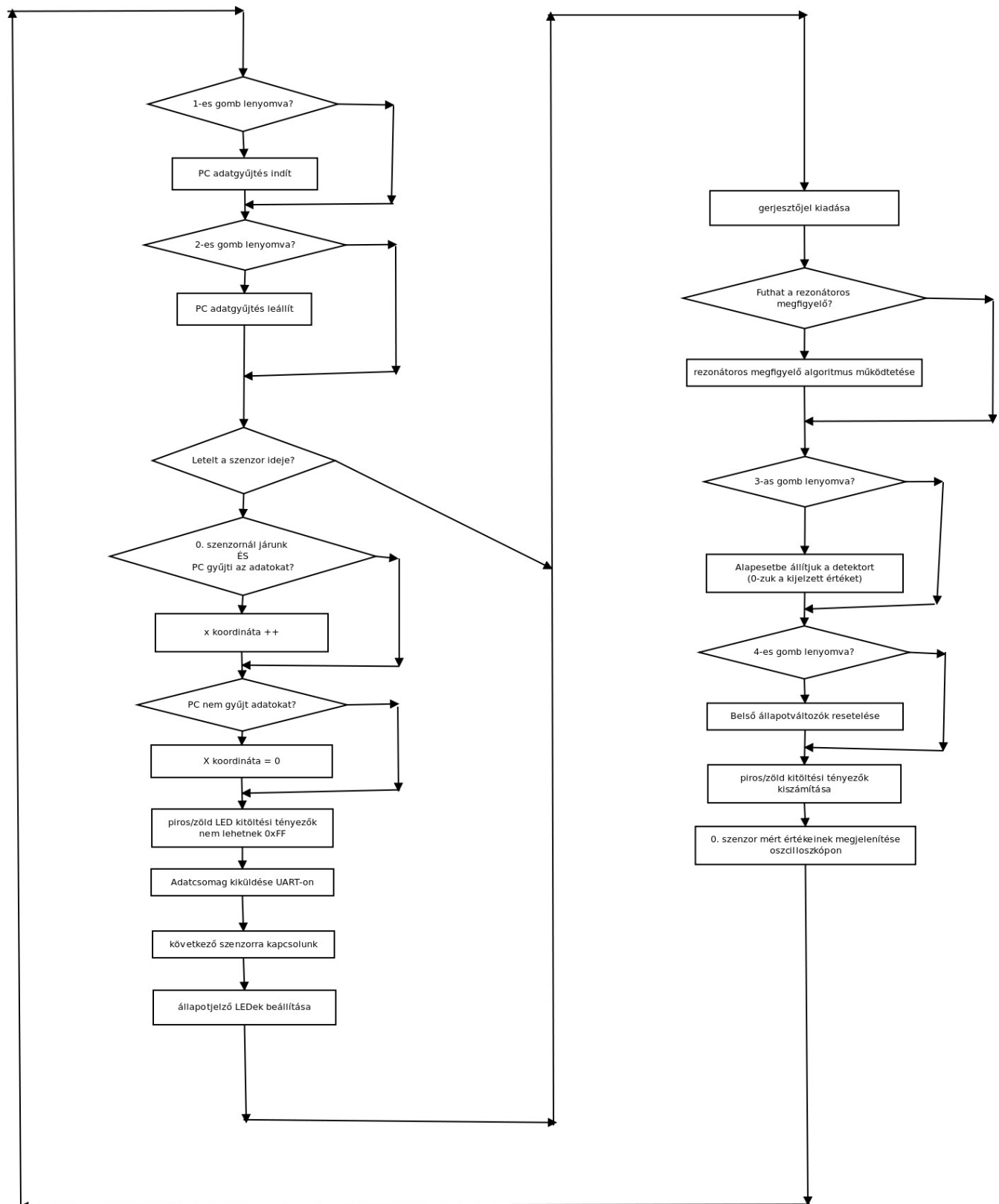
#### 7.1.1. Szoftver működésének bemutatása

A 7.1 ábrán látható a jelfeldolgozó processzor szoftverének folyamatábrája, ennek magyarázata lesz a fejezet témája.

A jelprocesszor programjának működése időzített, ciklikus szervezésű. A működési ciklusokat az AD átalakító mintavételezéskor generált megszakítása vezérli. Egy-egy mintavételi ciklusban történik az analóg jelek beolvasása, jelfeldolgozási algoritmusok futtatása, analóg kimenőjelek előállítása, és különböző vezérlési feladatok ellátása (pl. soros porton adatok küldése). A jelprocesszor 94 kHz mintavételezési frekvencián fut. Ez azt jelenti, hogy egy jelfeldolgozási ciklus kb. 10.64  $\mu$ s hosszúságú. A processzor az egyes szenzor adatait időben multiplexálva, egymástól elkülönítve dolgozza fel. Az egy szenzorra jutó mérési idő kb. 10.64 ms-ra van beállítva. Ezen belül a szenzoridő elején 400 mintavételi ciklusig, azaz kb 4.256 ms-ig nem indul el az algoritmus, hogy a szenzorokat kiválasztó multiplexer váltásából eredő tranziens lecsengjen, és ne zavarjon bele a jelfeldolgozásba. A maradék 5.744 ms elegendő időnek bizonyult az algoritmus beállításához. A program működésének vezérlése a fejlesztői kártyán található nyomógombok segítségével történik.

A mintavételi ciklus elején a program az 1-es illetve 2-es (fejlesztőkártyán található) gombok állapotától függően elindítja vagy leállítja a PC-s adatgyűjtést. Az 1-es gomb lenyomásával elindul, a 2-es gomb lenyomásával leáll a PC-s adatgyűjtés. Ez azt jelenti, hogy a két gomb lenyomása közötti mért értékeket fogja a PC-s alkalmazás megjeleníteni.





ábra 7.1: A DSP szoftver folyamatábrája

Következő lépésben megvizsgálja a DSP, hogy letelt-e a szenzornak járó idő (letelt 1000 mintavételi ciklus). Ha nem telt le akkor folytatódik a gerjesztőjel kiadásánál a program. Ha letelt, akkor a következő feladatokat kell végrehajtani:

1. ha a PC éppen gyűjti az adatokat ÉS a 0. szenzornál járunk, akkor a PC számára létrehozott x koordinátát növelni kell, hiszen végigmentünk egyszer a szenzorokon, azaz x irányába elmozdítottuk a keresőfejet (legalábbis a program feltevése szerint). Ha a PC jelenleg nem gyűjti az adatokat, akkor 0-zuk ezt a változót.
2. Az adatsomagot összeállítjuk és kiküldjük UART-on keresztül. A csomagot mind a PC, mind a mikrokontroller megkapja és feldolgozza. A kommunikációra felhasznált csomag pontos formátumának bemutatása a fejezet végén található. A csomag tartalmazza a keresőfejen található multiplexerekre kiadandó kiválasztó jelet, a kijelző LED-ek meghajtásának vezérlőjelet, a mért  $\Delta U_{ki}$  értékeket (lásd 4.5 ábra), illetve a PC számára küldött vezérlőjelet, mely a PC-n az adatgyűjtés indítását és leállítását vezérli.
3. Ezután a következő szenzorra kapcsolunk. Ezt azért tesszük, mert lejárt ennek a szenzornak az időszelete, elvégeztük a vele kapcsolatos teendőket, mostantól a következő szenzor értéke kerül feldolgozásra.
4. A jelfeldolgozó kártyán található LED-eken binárisan megjelenítjük a program legfontosabb állapotváltozóit: aktuális szenzor sorszáma (alsó 3 bit), PC-s adatgyűjtés állapota (legfelső bit).

A szenzorváltással kapcsolatos teendők elvégzése után következik a gerjesztőjel pillanatnyi értékének kiadása. Ez egy szinuszjel, amely mindig az éppen aktuális szenzor rezonanciafrekvenciájával megegyező frekvenciájú.

Ezután következik maga a rezonátoros megfigyelő algoritmus. Ezen algoritmus futásának feltétele, hogy a szenzoridő kezdete után 400 mintavételi ciklus leteljen, ezzel ugyanis elkerülhető, hogy a multiplexerek váltásával kapcsolatos zavarok negatív hatásokat fejtsenek ki a rezonátoros megfigyelőre.

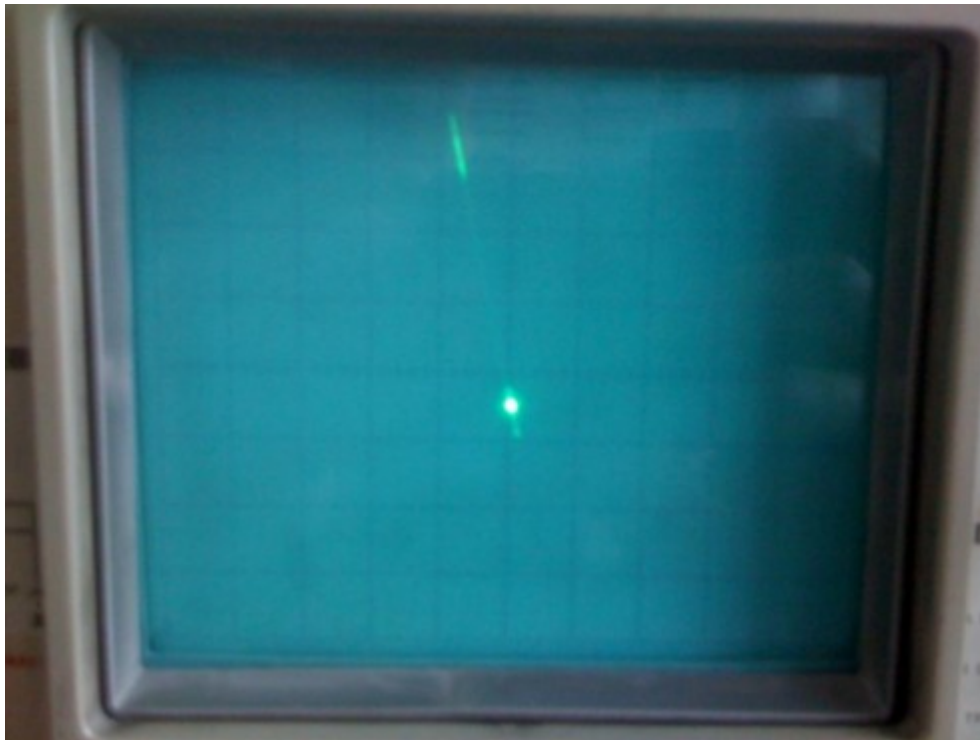
A következő lépés a fejlesztőkártyán található 3. illetve 4. nyomógombok értékének beolvasása. 3. lenyomása esetén nullázzuk az összes szenzor kijelzendő értékét, ezzel azt jelezzük, hogy nincs fém a keresőfej közelében. Ezt minden indításkor meg kell tenni, ezzel adjuk meg az alapállapotát a keresőfejnek, azaz a szenzoroknak csak az ehhez képesti megváltozását szeretnénk érzékelni. A 4.

gomb megnyomása esetén a belső állapotváltozók nullázódnak, reseteljük a rendszert.

Ezután következik a piros és zöld LED-ek kitöltési tényezőinek kiszámítása, amelyet majd a mikrovezérlőnek kiküldünk UART-on keresztül, és a mikrovezérlő az adatokkal aktualizálja a LED-eket vezérlő változóit. A kitöltési tényezők meghatározása a következő képpen történt:

- Tapasztalat szerint a mért értékek a 2. 3. és 4. negyedsíkban helyezkednek el, ezért a fém típusára következtetni a következő egyszerű szabály alapján lehet. Ha csak a zöld LED gyullad ki, akkor a 2. síknegyedbe esik a mért érték, ha csak a piros, akkor a 4.be, ha mindkettő kigyullad, akkor a 3. síknegyedbe esik. Ezen módszer előnye, hogy egyértelműen megkülönböztethető 3 fémtípus. Hátránya, hogy nem lehet ez alapján pontosabb következtetést levonni.
- A fém közelségének kijelzése a LED kitöltési tényezőjével, azaz erősségével történik. Először [0-1] intervallumba normálom a mért értéket (osztom a kijelezni kívánt legnagyobb értékkel, értékplafonnal), ezután szorzom a maximális kitöltési értékkel, amely 254. Azért nem 255, mert 0xFF nem lehet az átküldött érték, ugyanis a 0xFF az adatcsomag elejének jelölésére szolgál, ahogyan az ezen fejezet végén bemutatásra kerülő csomagformátum leírásánál láthatjuk..

Ezután még a 0. szenzor értékeit hibakeresést megkönnyítendő kijelzem úgy, hogy az oszcilloszkóp meg tudja jeleníteni. Ehhez kapcsolódó mérési eredmény a 7.2. ábrán látható. Az oszcilloszkóp XY üzemmódban kirajzolt komplex érték  $\Delta U_{ki}$  mennyiséget jelöli.



ábra 7.2: 0. szenzor megjelenítése oszcilloszkópon

A DSP a hozzá kapcsolódó eszközökkel a következő formátumú csomagok segítségével kommunikál:

0xFF	multiplexer kiválasztójel	zöld LED kitérés	piros LED kitérés	Command	mért érték képzetes felső	mért érték képzetes alsó	mért érték valós felső	mért érték valós alsó	x koordináta
------	---------------------------	------------------	-------------------	---------	---------------------------	--------------------------	------------------------	-----------------------	--------------

ábra 7.3: Egy DSP által előállított csomag felépítése

1. Csomag keret: Ez egy speciális byte, a 0xFF kiküldése, mely egy önálló csomag kezdetét jelző, keretezésre használt érték. Mivel a 0xFF speciális szerepet lát el, így a csomagban egyéb pozícióban nem szerepelhet. A későbbiekben láthatjuk, hogy ez bizonyos megkötéseket von maga után, de viszonylag egyszerű kommunikációt tesz lehetővé pl az ún. escape karakterek használatához képest.
2. Következő mutiplexer állás: Ez a keresőfejen található multiplexerek jele, mind a PC mind a mikrovezérlő számára fontos adat. Azt jelzi, hogy melyik szenzor következik most. A későbbiekben timeslice\_no változóval jelölöm, mely az éppen aktuális (a küldéskor éppen

lejárt) szenzor száma. A mikrovezérlő ezzel fogja vezérelni a multiplexereket, a PC pedig a kirajzolt képen gyakorlatilag az y koordinátának fogja fel.

3. sensor[timeslice\_no].green\_strength: Ezt a mezőt csak a mikrovezérlő használja fel. Azt jelenti, hogy a most lejáró szenzorhoz (amelynek mért értékei éppen beálltak) tartozó zöld LED kitöltési tényezőjét ennyire kell beállítani.
4. sensor[timeslice\_no].red\_strength: Ezt a mezőt csak a mikrovezérlő használja fel. Azt jelenti, hogy a most lejáró szenzorhoz (amelynek mért értékei éppen beálltak) tartozó piros LED kitöltési tényezőjét ennyire kell beállítani.
5. Command: Ez a mező a PC számára tartalmaz vezérlő információt, mégpedig azt, hogy fusson-e az adatgyűjtés, vagy ne. Azaz az 1-es gomb lenyomásától a 2-es gomb lenyomásáig ez a mező 'r' (mint run) értékű, mert ezeket az adatokat szeretnénk a PC-vel ábrázoltatni. Egyébként az értéke 's' (mint stand), ilyenkor a PC számára érdektelenek a mérési eredmények, amelyeket a csomag tartalmaz.
6. sensor[timeslice\_no].x\_im\_diff\_forMATLAB\_upper: A mért érték ( $\Delta U_{ki}$ ) képzetes részének felső byteja. Ez csak a PC által felhasznált adat. Tapasztalatok alapján a mért jel a belső változókra leképezve maximálisan  $10^{-4}$  nagyságrendű tartományban található. A PC és a mikokontroller felé küldött adatok viszont két byte-os egész számok, így a következő formátumkonverzió elvégzése szükséges. A következő lépések történtek külön az upper és külön a lower értékekre:

#### 6.1. upper:

- a. Az eredeti értéket és a legmagasabb kijelzendő érték (plafonérték) hányadosát beszoroztam  $2^{16-2} = 16384$  -gyel. Azért kellett 2-t kivonni a kitevőből, mert egyrészt a felső byte legfelső bitje elveszik, mert ki kell zárni a 0xFF lehetőséget, másrészt ez egy előjeles szám, tehát a felülről második bit előjel bit lesz. Ezzel elhelyeztem az értéket a [-16384....16383] skálán.
- b. Ezután osztottam 256-tal, azaz 8 bittel jobbra eltoltam
- c. integer típusúvá konvertáltam
- d. bitenként szoroztam 0x7F-fel, ezáltal biztosított, hogy 0xFF nem mehet ki, ennek az

értéknek ugyanis speciális szerepe van, a csomag első byteja mindig 0xFF érték. Így a legfelső bit mindenképp 0.

6.2. lower:

- a. Az upper-től annyiban különbözik, hogy nem osztottam 256-tal, hiszen mindenképp az alsó 8 bitre képződik a szám alja
  - b. illetve bitenként 0xFE -vel maszkoltam (mert ki kellett zárni a 0xFF értéket), ezáltal elveszett a legalsó bit. Az utolsó bit csonkolásával csökken ugyan a felbontás, de feltehetőleg ez nem okoz jelentős csökkenést az érzékenységben.
7. sensor[timeslice\_no].x\_im\_diff\_forMATLAB\_lower: A mért érték (  $\Delta U_{ki}$  ) képzetes részének alsó byteja. A fentebb ismertetett módon képződik.
  8. sensor[timeslice\_no].x\_re\_diff\_forMATLAB\_upper: mért érték (  $\Delta U_{ki}$  ) valós részének felső byteja. A fentebb ismertetett módon képződik.
  9. sensor[timeslice\_no].x\_re\_diff\_forMATLAB\_lower: mért érték (  $\Delta U_{ki}$  ) valós részének alsó byteja. A fentebb ismertetett módon képződik.
  10. x\_coordinate: Ez az érték lesz a PC-s alkalmazás által kirajzolt ábrának az x tengelye, az a tengely amellyel párhuzamosan húzzuk a keresőfejet PC-s adatgyűjtés közben. Ezt akkor növeljük, ha a 0 szenzorhoz érkeztünk, azaz körbeértünk egyszer a szenzorokon, ilyenkor ugyanis feltételezetten egy egységgel elmozdítottuk a keresőfejet x irányba.

### 7.1.2. Rezonátoros megfigyelő algoritmus

A DSP a szenzorok által adott válaszjel fázisának és amplitúdójának mérését a 4.1.2. alfejezetben bemutatott rezonátor alapú megfigyelő algoritmus segítségével méri. Ebben az alfejezetben a több szenzor jelének feldolgozására alkalmas algoritmus C nyelven történő megvalósításának részletei találhatóak.

A rezonátorcsatornák közül a számítási komplexitás csökkentése érdekében csupán az egyenkomponenshez tartozó illetve a gerjesztőjel frekvenciájára hangolt csatornát valósítottam meg, mivel egyéb harmonikus komponenst nem tartalmaz a jel. Habár DC komponenst nem adunk ki gerjesztésként, de az óhatatlanul megjelenik az áramkörök offszetfeszültsége miatt.

A rendszerben minden szenzor kimenőjéhez külön rezonátorblokk tartozik. Az egyes

rezonátorblokkok állapotváltozói és paraméterei ennek megfelelően egy nyolc elemű struktúratömbben kerülnek tárolásra, így a tömb megfelelő elemére hivatkozva elérhetőek a szenzorokhoz tartozó adatok.

A nyolc szenzor jelének kezelése időmultiplexelt módon történik: a DSP ciklikusan, előre meghatározott ideig gerjeszti az egyes szenzorokat, és az éppen adott szenzorhoz tartozó rezonátorblokk struktúrájának mezőit használja a válaszjel feldolgozásához.

A fejezet további szakaszában részletesen ismertetem a 4.6 ábra alapján implementált, valamint több szenzor jelének feldolgozására felkészített rezonátoros algoritmust. A kiemelt (Courier) betűtípussal szedett részek a konkrét programkódot jelölik, és ezeket követi az adott programozási lépés magyarázata.

```
sensor[timeslice_no].cn_re = cosf(2.0 * pi * phase);  
sensor[timeslice_no].cn_im = sinf(2.0 * pi * phase);
```

Létrehoztam egy `Sensor` nevű struktúra típust, melynek mezőiben tárolódnak a szenzor adatai (pl. mért érték szöge, valós és képzetes része, piros és zöld LED kitöltési tényezők, a válaszjel vektor hossza). Nyolc darab ilyen struktúrát hozok létre, amelyeket egy `sensor` nevű tömbbe helyezek, és a `timeslice_no`-val indexelem ezt a tömböt.

A `timeslice_no` egy [0:7] intervallumba eső integer típusú szám, azon “időszelet” számát jelöli, amelyhez tartozó szenzor éppen gerjesztés alatt áll, és a DSP ezen szenzor válaszjelét dolgozza föl.

A `sensor` tömbbe kerül nyolc `Sensor` típusú struktúra, melyek `cn_re` illetve `cn_im` mezői a megfigyelő folyamatábráján látható (4.6 ábra) C komplex egységvektor valós illetve képzetes részei. Ezek forgóvektorok, ezért a `sin` illetve `cos` függvények argumentumában szerepel a mintáról mintára növekvő `phase` változó. A valós és képzetes rész számítása az Euler-formula segítségével történik, miszerint:  $e^{jx} = \cos(x) + j \sin(x)$

A `phase` változó [0:1] intervallumba eső float típusú érték, amely minden ciklusban egy, a mintavételi frekvencia és a kiadott jel frekvenciájának viszonyából adódó `dphase` (fázis megváltozása) mennyiséggel növekszik. Ha 1 fölé ér, akkor kivonunk belőle 1-et, így [0:1] között marad.

```
y_out = 2*(sensor[timeslice_no].x_re* sensor[timeslice_no].cn_re
        - sensor[timeslice_no].x_im* sensor[timeslice_no].cn_im);
```

Az `y_out` változó a rezonátor kimenőjele. Esetünkben az algoritmus megvalósítása egyszerűsödik, ugyanis csak három csatorna esetén felhasználjuk, hogy valós jelre  $X$  és  $c$  értékek komplex konjugált párt alkotnak valós jelekre nézve, így:

$$y_{ki} = \underbrace{(X_{\Re} + j X_{\Im})(C_{\Re} + j C_{\Im})}_{\text{egyik csatorna}} + \underbrace{(X_{\Re} - j X_{\Im})(C_{\Re} - j C_{\Im})}_{\text{másik csatorna}} = 2(X_{\Re} C_{\Re} - X_{\Im} C_{\Im})$$

Ez látható a fenti kódsorban.

```
y_out += sensor[timeslice_no].y_in_DC;
```

Ezen felül még a DC csatornát is hozzáadtam az előző két csatornához.

```
sensor[timeslice_no].err = y_in - y_out;
```

A fenti kódsor a rezonátor kimenőjeléből és a szenzortól jövő  $y_{in}$  jel különbségéből számítja a rezonátor hibajelét.



```
if(wait_for_switch == 0) { //leftIn = visszaolvasott jel
    sensor[timeslice_no].y_in_DC =
    (1-y_in_DC_alfa) * sensor[timeslice_no].y_in_DC +
    y_in_DC_alfa * sensor[timeslice_no].err;
}
```

A DC csatorna megvalósítása. A wait\_for\_switch változó akkor nulla, ha az algoritmus működhet. Ez a szenzoridő elejétől számolva 400 mintavételi ciklusig 1-es, azaz eddig nem működhet az algoritmusnak ez a része.

```
if(wait_for_switch == 0) {
    sensor[timeslice_no].x_re = sensor[timeslice_no].x_re +
    sensor[timeslice_no].err*alfa*sensor[timeslice_no].cn_re;
    sensor[timeslice_no].x_im=sensor[timeslice_no].x_im -
    sensor[timeslice_no].err*alfa*sensor[timeslice_no].cn_im;
} else { }
```

Az  $X'_{k,n}$  mért érték kiszámítása, amely egyre pontosabban megközelíti a megfigyelt jel Fourier-együtthatóit.

### 7.1.3. Többszenzoros fémkereső algoritmus

Az egyszzenzoros fémkereső algoritmushoz képest a többszenzoros esetben a következő dolgokra kell figyelni:

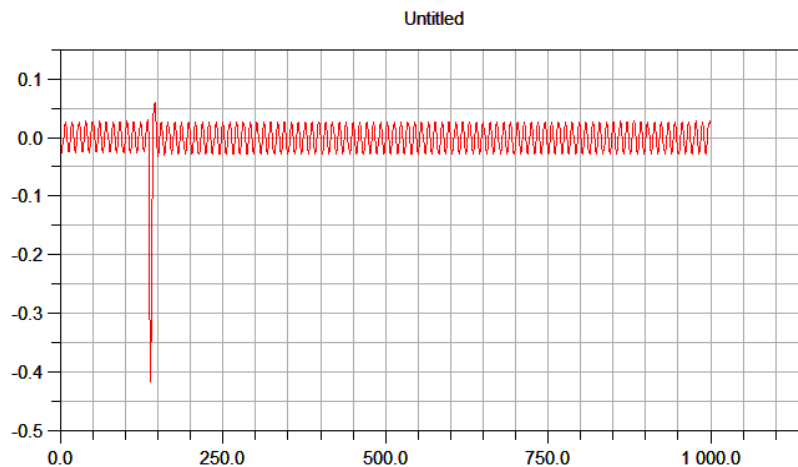
- Elég hosszúnak kell lennie az egy szenzorra jutó időnek, mert minden időszelvény alatt a rezonátornak be kell állnia a megfelelő mértékig, azaz a hibajel 0 körüli beállításáig, hogy az elhanyagolható legyen a mért érték nagyságához képest.
- Annyira viszont ne legyen hosszú egy időszelvény, hogy ez összemérhető legyen azzal az idővel, ami a keresőfej pl. 1cm elmozdításához szükséges. Általánosan megfogalmazva az egyfajta cél, hogy a szenzor jellemző hosszának (átmérő) kis százalékát (pl. 10%-át) tenné meg a keresőfej, mialatt egyszer végigfut az összes szenzoron.

Az is különbség az egyszenzoros esethez képest, hogy ilyenkor az átállás a következő szenzorra időt igényel, illetve átkapcsoláskor zavarok lépnek fel. Ezért ilyenkor az átállás után rövid ideig még nem célszerű elindítani az algoritmust. A következő tényezők késleltetik az algoritmus elindítását:

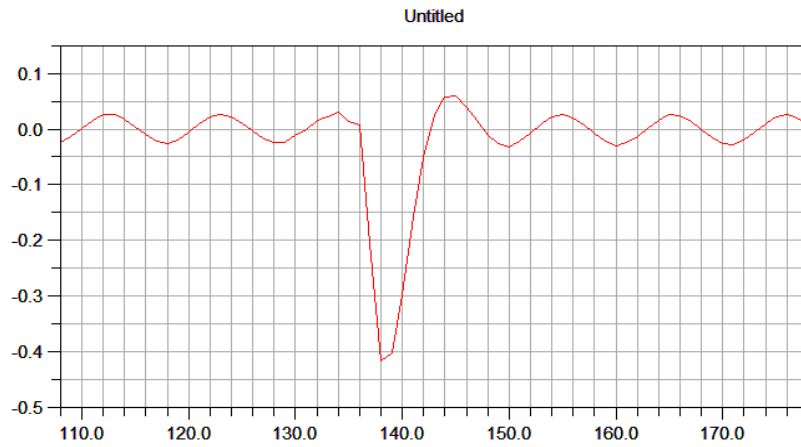
- adatátviteli késleltetés (adatsomag)
- multiplexerek váltási ideje
- analóg szenzor beállítás

Ezeket a tényezőket kellett szem előtt tartani, azonban az derült ki, hogy nem szükséges részleteiben vizsgálni a késleltetéseket.

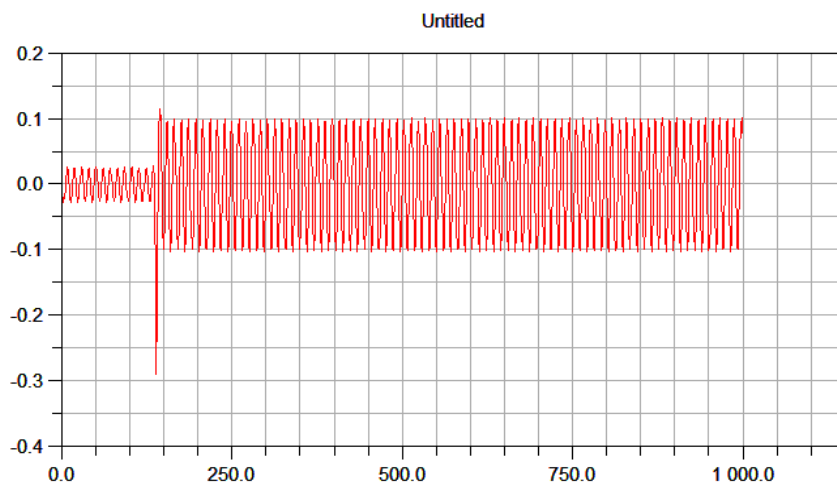
A 7.4, 7.5, 7.6 és a 7.7 ábrákon láthatóak a DSP-nek a szenzorok felől érkező bemenő jelének mintái az idő függvényében. A nulladik időindex jelöli a multiplexer váltását tartalmazó adatsomag kiküldésének kezdetét a DSP felől a mikrovezérlőig. Látható, hogy amikor a multiplexer átvált a másik szenzorra, akkor a válaszjelben (ami egyben a megfigyelt jel) hirtelen nagy ugrás keletkezik. A két mérés esetében a 140. mintánál vált a multiplexer. Mivel bőven van idő az algoritmus beállítására, ezért nem kellett spórolni az idővel, így az algoritmus nem kezd el futni a 400. mintáig.



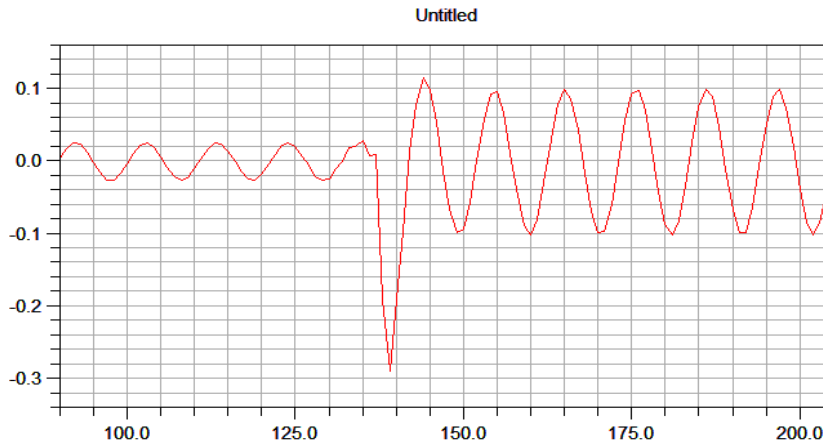
ábra 7.4: Szenzor átállása



ábra 7.5: Szenzor átállása (közelítve)



ábra 7.6: Szenzor átállása. A következő szenzor közelében fém található, így nagyobb az ugrás a váltás során.



ábra 7.7: Szenzor átállása (közelítve). A következő szenzor közelében fém található, így nagyobb az ugrás a váltás során.

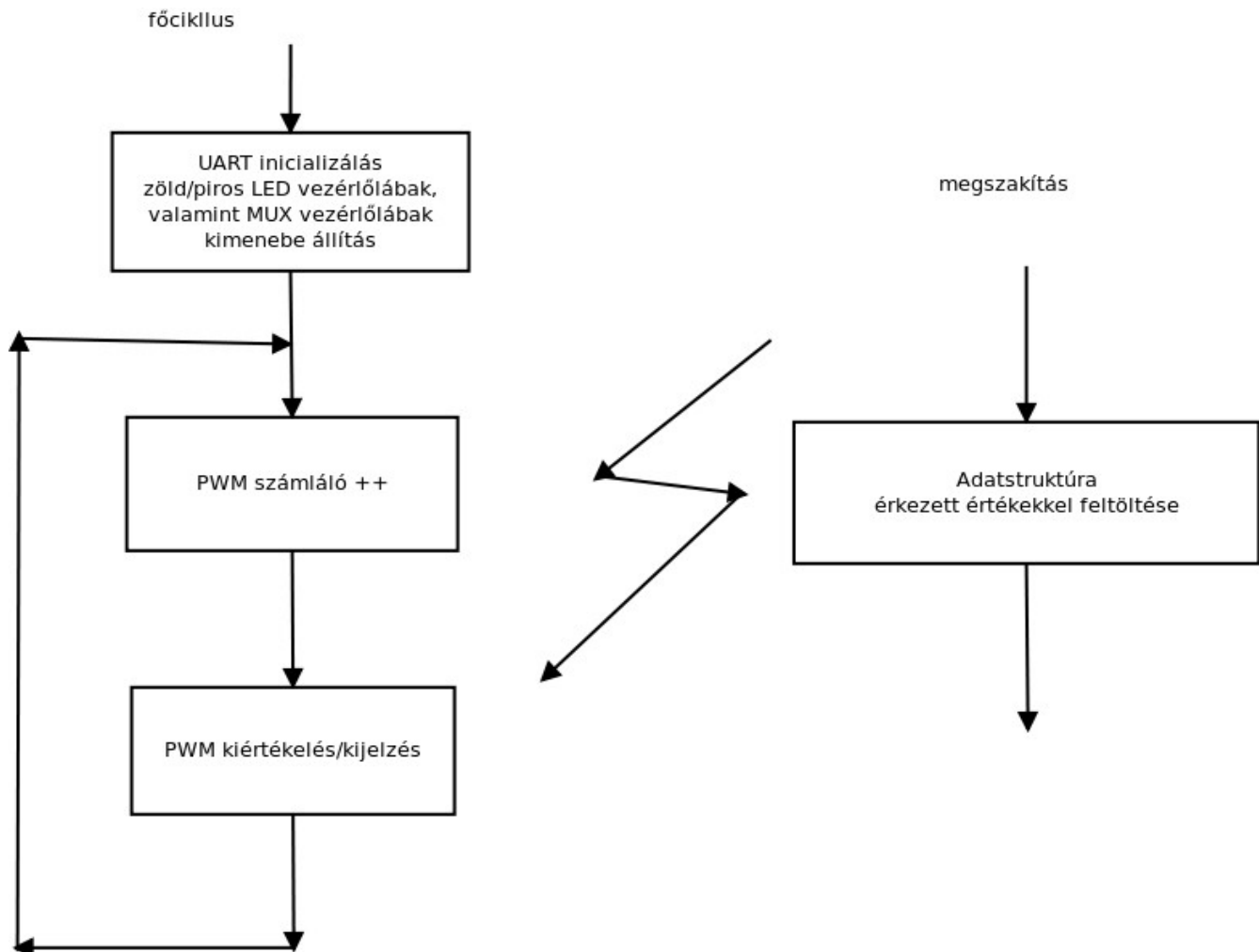
## 7.2. A mikrovezérlő programja

A mikrovezérlő működését leíró folyamatábra a 7.8 ábrán látható. A kimeneti lábakra van rákötve a 8 piros és 8 zöld LED, illetve 3 kimeneti láb szükséges még a multiplexerek vezérléséhez.

A mikrovezérlő futása a perifériák, valamint a ki/bemenetek inicializálásával kezdődik. Ezután egy végtelen ciklusba lép a program, amely ciklusban a PWM értékek kiértékelődnek, valamint a multiplexer vezérlőjelei frissítésre kerülnek.

Az UART-on érkező adatok megszakítást generálnak. Ekkor az érkezett adatok alapján aktualizálja a mikrokontroller a saját adatstruktúráját, ezt használja új multiplexer vezérlőjelként illetve LED kitöltési tényezőként.

Habár a mikrovezérlő tartalmaz hardveres PWM modult, az nem képes 16 független PWM jel előállítására, emiatt esett a választás a szoftveres megvalósításra.



ábra 7.8: A mikrovezérlő szoftver folyamatábrája

### 7.3. A PC-s adatgyűjtő programja

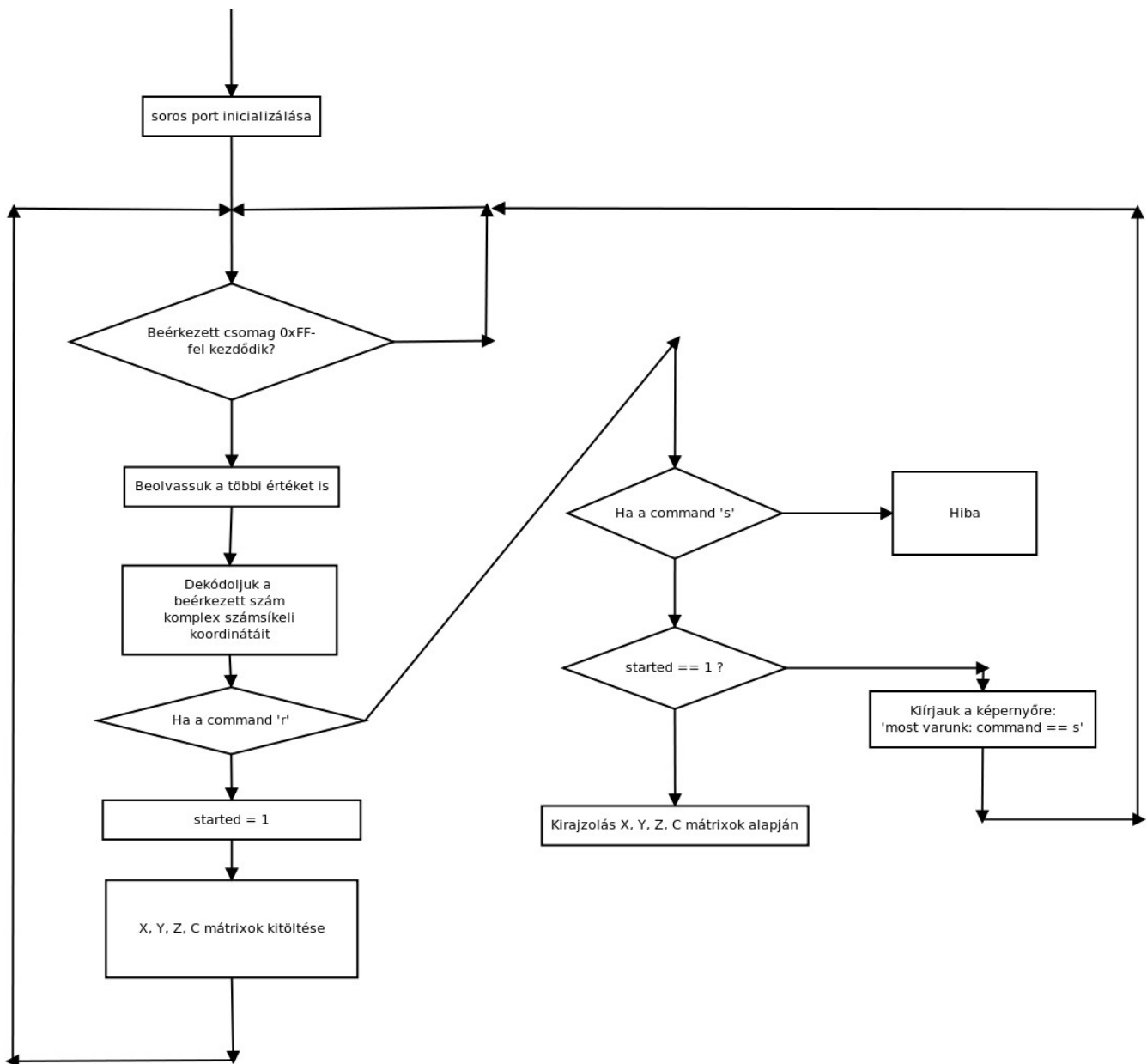
A PC-s adatgyűjtő program folyamatábrája a 7.9 ábrán látható. A PC-n MATLAB segítségével történt az adatok fogadása és megjelenítése.

Első lépésben egy soros port inicializálás történik, hiszen a soros porton érkező csomagok alapján fogja az adatgyűjtő program kirajzolni a fém(ek) elhelyezkedését. A PC a jelfeldolgozó processzortól kapja a csomagokat, a csomag felépítése a 7.1.1. fejezetben részletesen bemutatásra kerül. A program indítása után tájékoztató információ kerül a képernyőre, mely szerint még nem érkezett a PC számára lényeges csomag. A PC addig nem kezdi el az adatok kiértékelését, amíg a jelprocesszor a command mezőben 'r' (mint run) karaktert nem küld, ez jelzi a felhasználó szándékát, hogy a mostantól mért értékeket kell kirajzolnia a PC-nek. Ekkor elkezdődik az X, Y, Z, C mátrixok

feltöltése, minden csomag alkalmával egy újabb tag kerül az összes mátrixba. A mátrixok rövid magyarázata:

- X: Az aktuális ábrázolandó érték  $x$  koordinátája, az értéket tartalmazó csomag utolsó mezőjében szerepel.
- Y: Az aktuális ábrázolandó érték  $y$  koordinátája, az értéket tartalmazó csomag második mezőjében szerepel, mint a szenzor száma. Az  $y$  tengely a szenzorok vonalával párhuzamos, az  $y$  értékek pedig a szenzorok számait veszik fel.
- Z: Az aktuális ábrázolandó érték  $z$  koordinátája. Ez jelzi a fém közelségét A  $z$  értéket tartalmazó csomag 6-9-ik mezői alapján kerül meghatározásra. Először a felső és alsó byteokból képezzük az ábrázolandó érték képzetes és valós részét. Ezután Pitagorasz tétellel összegezzük a két vektort, így megkapjuk a hosszát. Ez kerül ábrázolásra.
- C: Az aktuális ábrázolandó érték színeként fog megjelenni a megjelenítésben. Ez a mért érték szöge, azaz a fém típusa alapján kerül meghatározásra. A két szélső érték közötti választóvonal  $45^\circ$ -nál van, mert tapasztalat szerint az első negyedbe soha nem estek a mért értékek, így nem lesz hirtelen színváltás hasonló fémek esetében.

Ha a jelprocesszor a csomag command mezőjében 's' (mint stand) karaktert küld, akkor befejeződik a mátrixok feltöltése, és a program kirajzolja a mátrixok alapján a fémek elhelyezkedését és típusát. Erre láthatók példák a 8. fejezetben.



ábra 7.9: PC-s adatgyűjtő szoftver folyamatábrája

## 8. Mérési eredmények

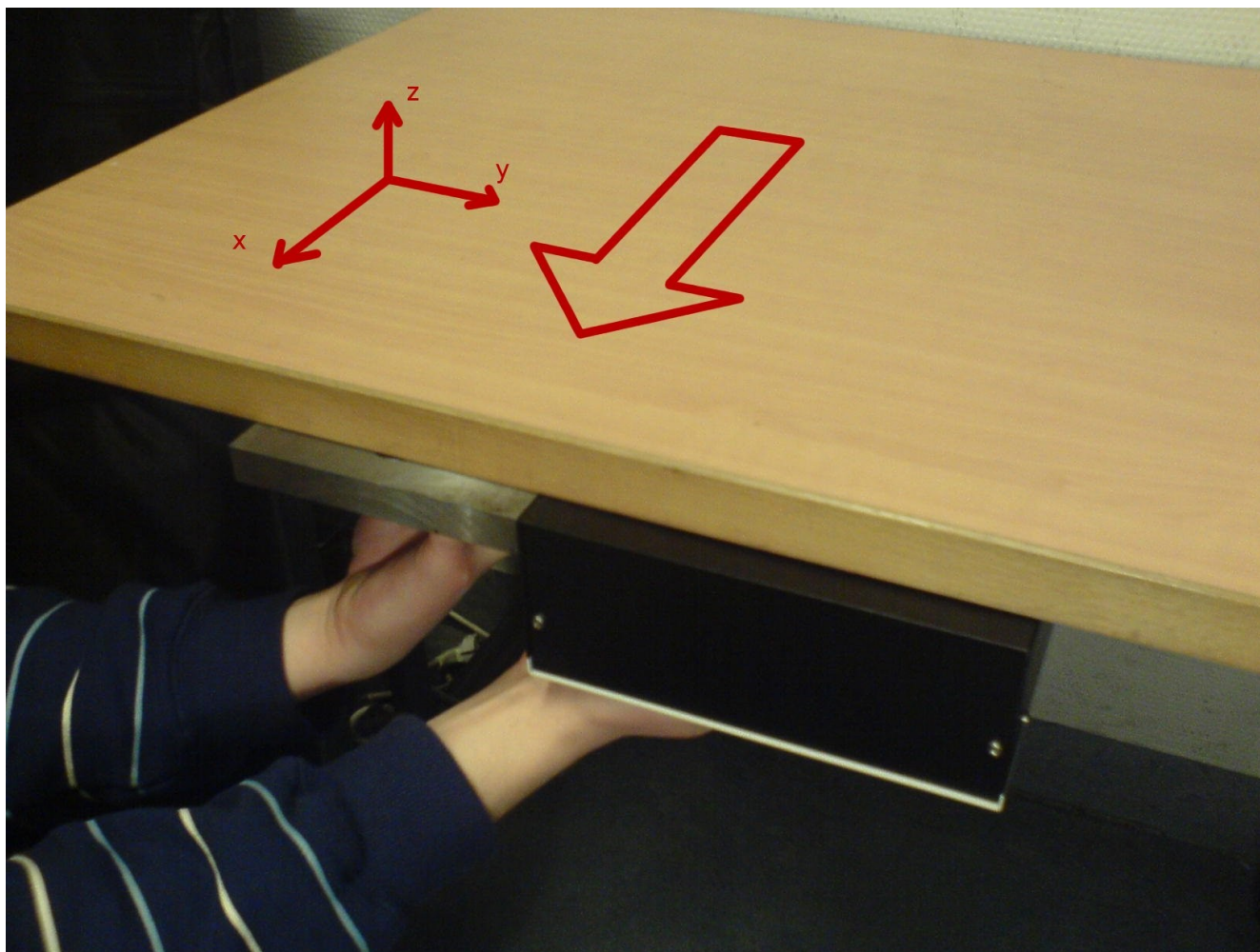
Ebben a fejezetben az elkészült fémkeresővel végzett mérési eredmények kerülnek bemutatásra. A bemutatásra kerülő MATLAB által előállított ábrákon a 7.3 alfejezetben leírtak alapján a szín a fém hatására a szenzorok kimenőfeszültség megváltozásának ( $\Delta U_{ki}$ ) fázisával arányos, míg a 3D-s függvény magassága a  $\Delta U_{ki}$  abszolútértékével arányos.

A 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6 és 8.7 ábrákon a 8.1 szerinti fizikai elrendezéshez tartozó eredmények PC-s megjelenítése látható. A 8.1 ábrán látható, hogyan történt a kísérlet. A tesztet két, nagy kiterjedésű fém felhasználásával végeztem: egy acéllappal illetve egy alumínium műszerdobozzal. A fémeket és a keresőfejet egy 2 cm-es faasztal választotta el, ezzel kívántam tesztelni, hogy valamilyen levegőtől eltérő egyéb anyagon keresztül is működik-e az eszköz. A keresőfej segítségével a 8.1 ábrán nyíllal jelzett irányba tapogattam le az asztal felületét úgy, hogy először az acéllap fölött, aztán az acéllap és műszerdoboz határvonala mentén, végül a műszerdoboz fölötti területen húztam végig a szenzorfejet. Az ábrákon is ilyen sorrendben ábrázoltam a mérési eredményeket.

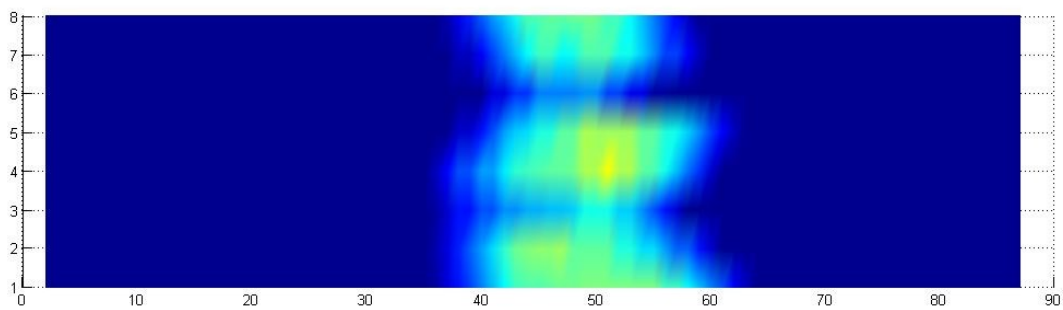
A kísérlet sikeresnek mondható, hiszen jól elkülöníthető az ábrán a két fémtípus. Megfigyelhető, hogy a műszerdoboz esetében sokkal simább felületet kapunk, a vasötvözet esetében eddig ismeretlen okból sokkal egyenetlenebb a fém felszíne. Az alak ebben az esetben is viszonylag jól kirajzolódik, de kevésbé kontrasztosan. A műszerdoboz szélén azért változik fokozatosan a szín, mert távoli fémtárgyak esetén a válaszjel szögébe nem csak a fém típusa játszik szerepet, hanem az elhelyezkedése és határjelenségek is (2.4. fejezet). A közepén már egyértelműen megállapítható a fémtípus.

Mivel a szenzor mozgatása kézzel történt, így a valódi illetve MATLAB-ban ábrázolt képeken tapasztalható némi eltérés. Ennek oka az lehet, hogy nem teljesen egyenletes sebességgel mozgatjuk a keresőfejet, illetve az sem biztos, hogy a mozgatás irányára pontosan merőlegesen állt a fej. Ezeknek a problémáknak a forrása az emberi mozgás precizitásának hiánya.

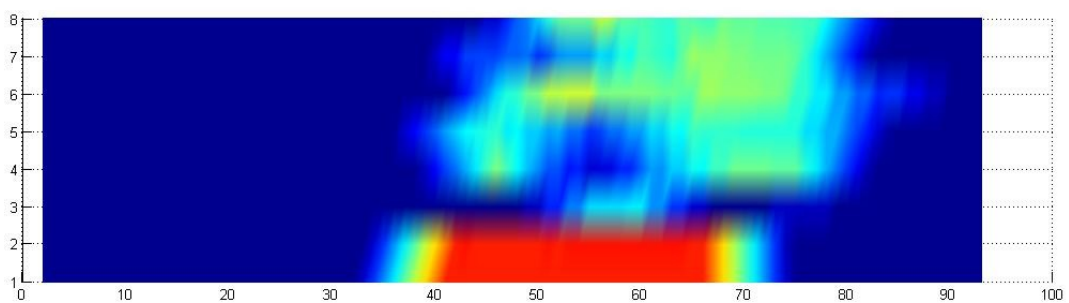




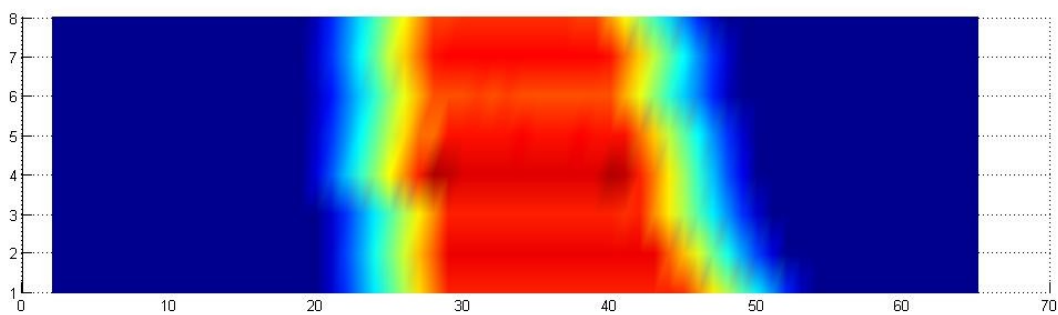
ábra 8.1: A fizikai elrendezés



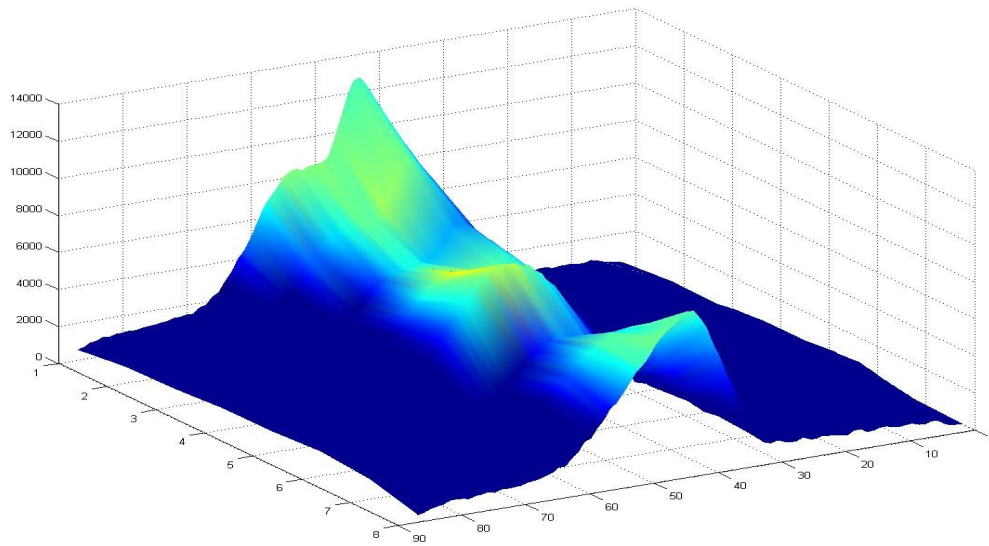
ábra 8.2: Vas lap felülnézete



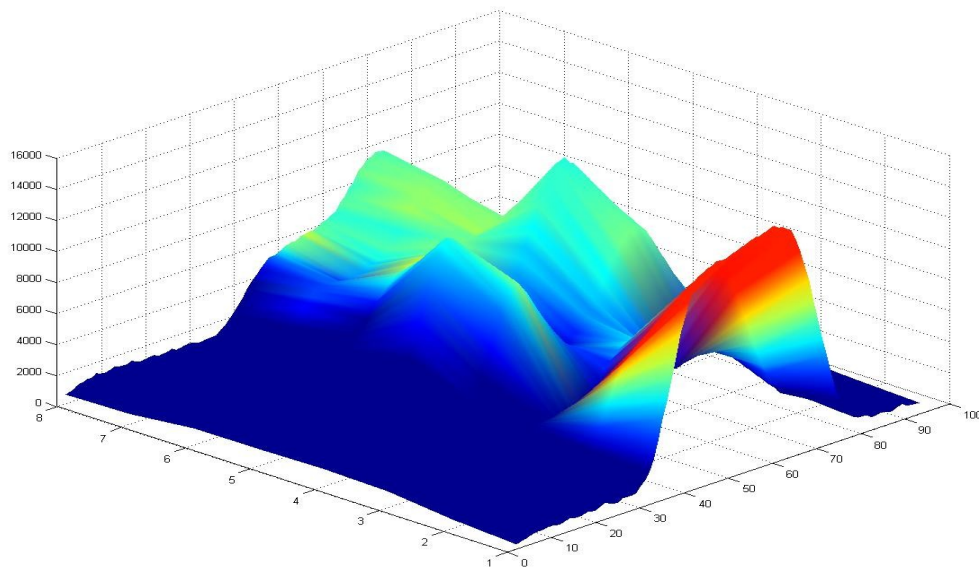
ábra 8.3: Vas lap és műszerdoboz felülnézete



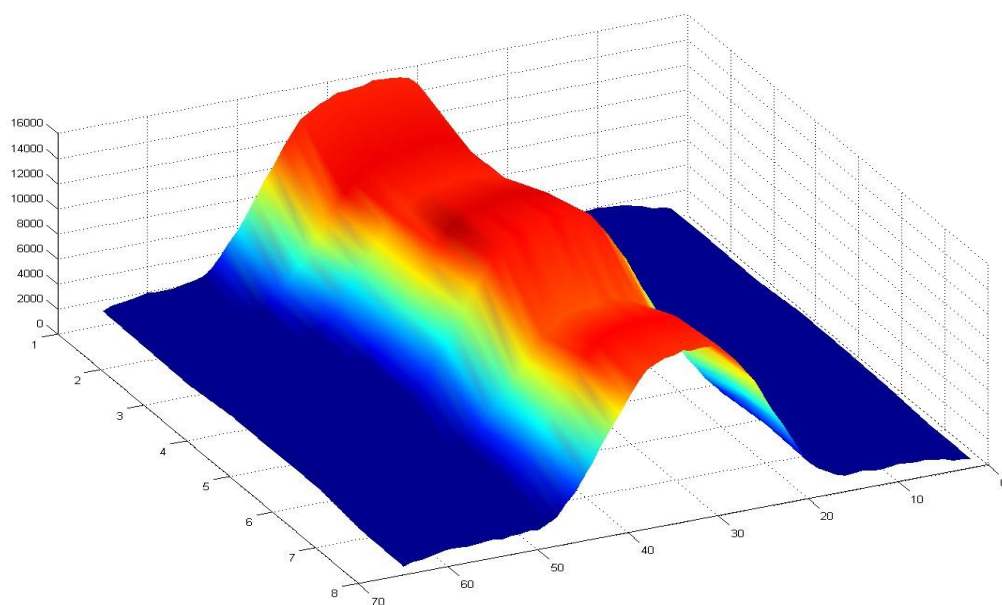
ábra 8.4: Műszerdoboz felülnézete



ábra 8.5: Vas lap 3D-s megjelenítése

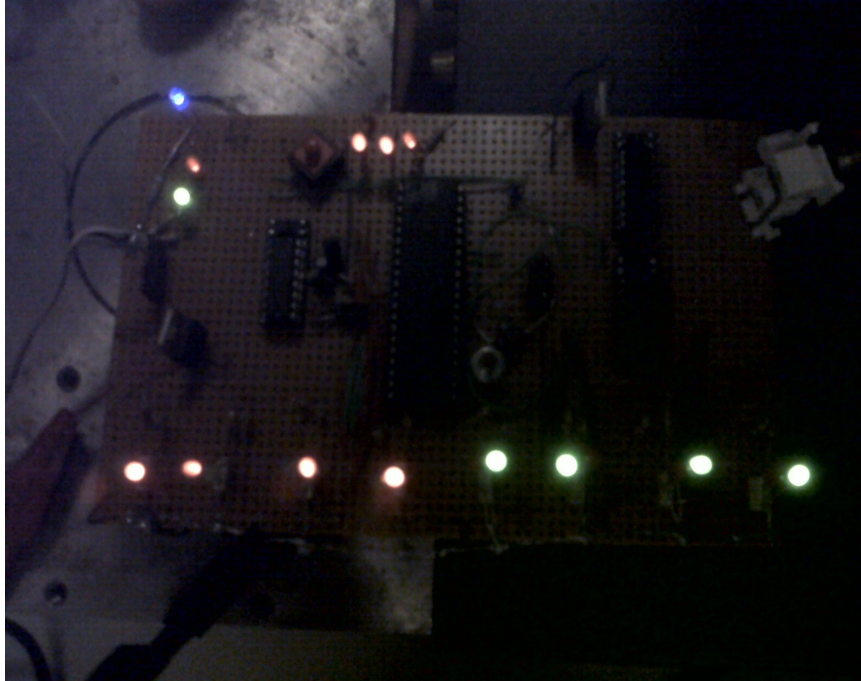


ábra 8.6: Vas lap és műszerdoboz 3D-s megjelenítése



ábra 8.7: Műszerdoboz 3D-s megjelenítése

A 8.8 ábrán látható a keresőfej LED-es megjelenítése az érzékelt fémekről. Vas esetében a piros LED-ek világítanak, az alumínium műszerdoboz esetében pedig a zöld LED-ek.

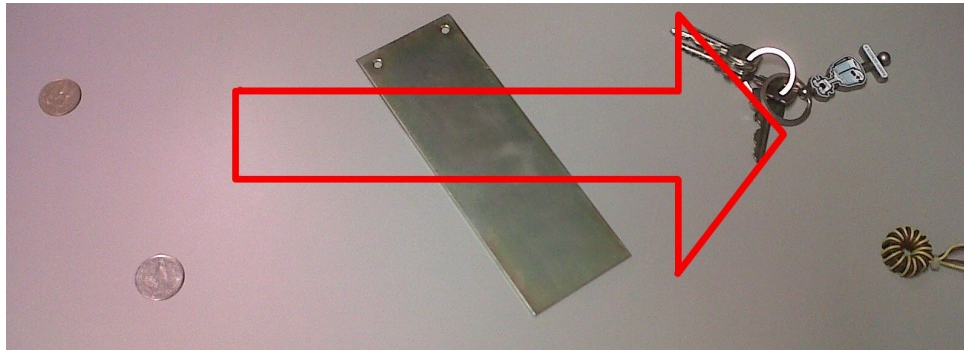


*ábra 8.8: Két különböző fémtípus LED-es megjelenítése*

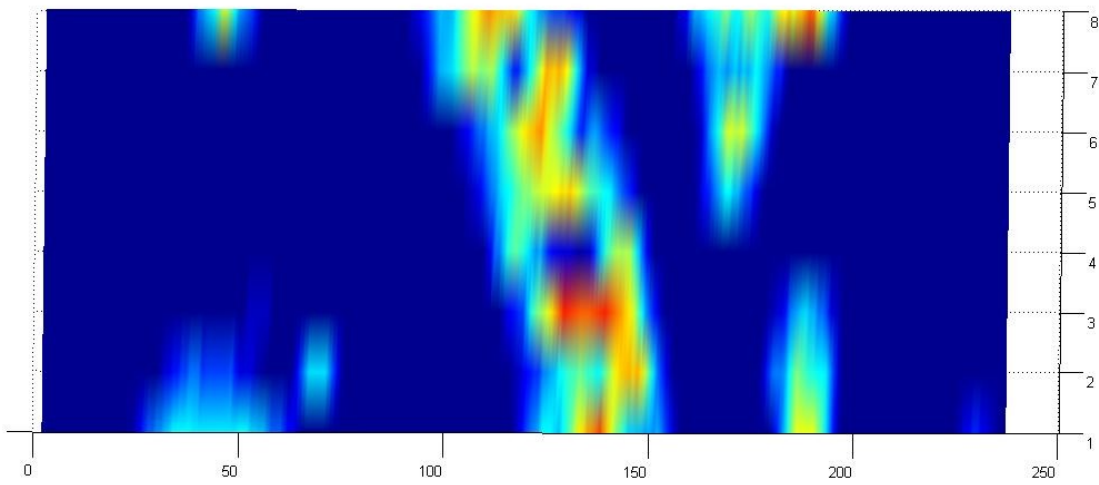
A 8.9 8.10 és 8.11-es ábrákon egy másik fizikai elrendezés, és a hozzá tartozó PC-s megjelenítések láthatóak. A mérés során a keresőfejjel az asztal fölött kb. 2 cm-rel pásztáztam végig a felületet. Ennél a kísérletnél kevésbé kivehető a fémek típusa, és a 8.11 es ábrán látható felület sem egyenletes. A 8.10-es felülnézeti ábrán viszont egész jól kivehetőek a fémek alakjai.

Az előzőleg bemutatott méréshez képest szerényebb teljesítmény valószínűleg annak tulajdonítható, hogy az itt alkalmazott fémek mérete jóval kisebb.

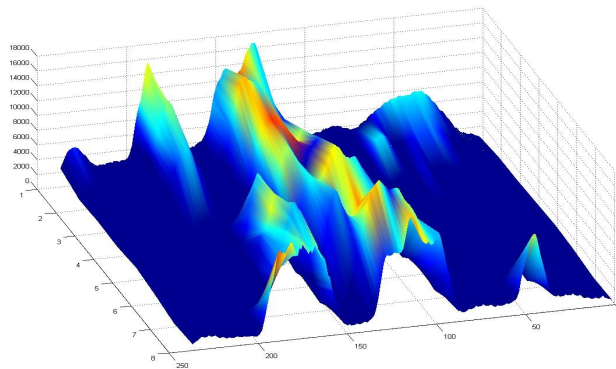




ábra 8.9: Példa fémek fizikai elrendezésre



ábra 8.10: A 8.9-es ábrán látható elrendezés felülnézeti képe



ábra 8.11: A 8.9-es ábrán látható elrendezés 3D-s megjelenítése

## 9. Összefoglalás

A szakdolgozat eredményeképp létrejött egy olyan fémdetektor prototípusa, mely képes az érzékelt fémeket típusonként elkülöníteni, és azokat 3D-s képen ábrázolni. Ez úgy lehetséges, hogy a keresőfejre nyolc szenzor került, és az ezekkel szkennelt felület kerül kijelzésre az ábrán. A szenzorok fémre adott válaszjelei időmultiplex módon kerülnek feldolgozásra DSP-n. A szenzorok fölötti LED-párok az adott szenzor által érzékelt fém típusát és közelségét jelzik. Az ábrák alapján levonhatók bizonyos következtetések a fémek alakjára és típusára vonatkozóan, mielőtt hozzáférnénk a fémhez.

Érdemes lehet elkészíteni egy végleges eszközt, amely nagyobb átmérőjű szenzorokkal rendelkezik, ezáltal nagyobb távolságban levő fémeket is érzékelné, illetve nagyobb felületet lehetne vele letapogatni.

## 10. Irodalomjegyzék

- [1] Nagymáté, Cs., Chrenkó, F.: Elektronikai füzetek, első szám, Fémkeresők
- [2] Cobra fémdetektor használati útmutató
- [3] ATMEGA32L, mikrovezérlő adatlap: [www.atmel.com/atmel/acrobat/doc2503.pdf](http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc2503.pdf)
- [4] Texas Instruments, MAX232 szintillesztő IC adatlapja: [www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf)
- [5] Texas Instruments, 8-1 analóg multiplexer/demultiplexer (CD74HC4051E) adatlapja:  
[www.datasheetcatalog.org/datasheets/120/107571\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/120/107571_DS.pdf)
- [6] ST, negatív feszültség stabilizátor IC (L7905CV) adatlapja:  
[www.datasheetcatalog.org/datasheets/120/107571\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/120/107571_DS.pdf)
- [7] ST, pozitív feszültség stabilizátor IC (L7805CV) adatlapja:  
[www.makershed.com/v/vspfiles/assets/images/l7805.pdf](http://www.makershed.com/v/vspfiles/assets/images/l7805.pdf)
- [8] Analog Devices fejlesztői kártya adatlapja:  
[www.analog.com/en/processors-dsp/sharc/adsp-21364/processors/21364-ezlite/eb.html](http://www.analog.com/en/processors-dsp/sharc/adsp-21364/processors/21364-ezlite/eb.html)
- [9] G. Péceli, "A Common Structure for Recursive Discrete Transforms," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, Vol. CAS-33, No. 10, Oct.1986., pp.1035-1036
- [10] L. Sujbert, G. Péceli, Gy. Simon, "Resonator Based Non-parametric Identification of Linear Systems," *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, Vol. 54., No. 1., Feb. 2005, pp. 386-390