



XXXII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia

2014



Hordozható multifunkcionális mérőműszer fejlesztése Android alapú mobil platformokhoz

Készítette:

Katona Róbert

Témavezető:

Dr. Fodor Dénes

Szakvezető

Mechatronikai mérnök MSc.

Járműmechatronika Intézeti Tanszék

Mérnöki Kar

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni Kis László Péternek a segítséget, a mérőműszer tervezésénél a funkciók kidolgozásában. Szintén köszönöm a Texas Instrumentsnek a lehetőséget, hogy részt vehettünk a versenyen illetve a minta termékeket, amelyeket kaptunk. Köszönöm még a Cliff Electronic Components UK cégnek a támogatást a verseny alatt. Nem utolsó sorban köszönöm Dr. Fodor Dénesnek a segítséget a dolgozat megírásában és a támogatást a versennyel kapcsolatban.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Technológiai kitekintés.....	3
2.1 Android operációs rendszer.....	4
2.2 Bluetooth technológia	5
2.3 Koncepció	8
3. Mérőműszer felépítése.....	10
3.1 Nagy pontosságú szinuszos hangfrekvenciás generátor kivitelezése.....	13
3.2 Két csatornás tárolós oszcilloszkóp kivitelezése.....	18
3.3 Multiméter funkció kivitelezése.....	21
3.3.1 Két méréshatáros 0-2 A árammérő modul.....	21
3.3.2 AC-DC Automata méréshatár váltós 0-40 V feszültség mérő	22
3.3.3 Automata méréshatár váltós 1Ω- 3 MΩ ellenállásmérő	23
3.4 Tápegység kivitelezése.....	24
4. Androidos szoftver.....	25
5. Összefoglalás	27
5.1 Alkalmazási lehetőségek	28
5.2 Jövőbeli tervek	29
6. Irodalomjegyzék	30

1. Bevezetés

A napjainkban is tartó informatikai forradalomnak köszönhetően manapság egyre több ember használ a mindennapi életben és munkája során okostelefonokat. Ezek nagy részén a Google által fejlesztett (nyílt) Android operációs rendszer fut. Az egyre növekvő piaci igényeknek köszönhetően ezek a mobil eszközök egyre gyorsabban fejlődnek, elég nagy kijelzővel, illetve elegendően erős processzorral rendelkeznek ahhoz, hogy mérési adatokat jelenítsünk meg rajtuk, illetve, hogy komolyabb számítási műveletekkel járó analíziseket is elvégezzünk velük (például egy valós időben történő gyors Fourier-transzformáció (FFT)) [1].

További komoly előnye a fejlett mobiltelefonoknak, hogy a vezeték nélküli csatlakozás lehetősége miatt (pl.: Bluetooth) egy labor mérés során, mint kijelző, szabadon mozgatható a laborban anélkül, hogy a méréseket fel kellene függeszteni.

Ezen előnyöket figyelembe véve merült fel az ötlet, hogy hasznos lenne egy olyan mérőműszer kifejlesztése, amely képes csatlakozni az okostelefonokhoz.

Műszaki terület számos részén egy termék diagnosztikája során igény van sokféle elektromos mérőberendezésre. Gyártás nem képzelhető el tesztelések nélkül, egy fejlesztő mérnök sem tud hatékonyan, jó minőségű terméket tervezni prototípus tesztelések nélkül. Így tervezés során a fejlesztés alatti berendezések igénylik a tesztelést, mérést, gyártás során pedig egy félkész-, késztermék ellenőrzése is fontos.

Tesztelés során vizsgálandó szempont, hogy a kigondolt, tervezett elektromos berendezés (eszköz, áramkör) úgy működik-e, mint az előzetes specifikációban leírtak. Ez a jelgenerálással és az áramkörben a jel alakulásának a visszamérésével vizsgálható.

Jelgenerátor, oszcilloszkóp, multiméter, tápegység mind létszükséglete egy labornak, hogy tesztelési, ellenőrzési munkákat végezhesünk. A koncepcióm azon alapszik, hogy ezt a sok és nagyméretű berendezést egy viszonylag kisméretű kompakt eszközzel kiváltsam, modern technikai alapokra építve.

A dolgozatomban bemutatásra kerül egy multifunkcionális tesztelő és mérőműszer, amely képes Androidos telefonokhoz Bluetooth segítségével kapcsolódni, valamint rendelkezik energiatakarékos üzemmódokkal is, hogy akár egy kisméretű akkumulátorról is hosszú időn keresztül üzemeltethető legyen. Egy eszközben egyesít számos funkciót, ezáltal alkalmas lehet a labor mérések során alkalmazott drága műszerek kiváltására. Többek között rendelkezik multiméter (áram, feszültség és ellenállás mérése), jelgenerátor és oszcilloszkóp (200 millió minta per másodpercenkénti mintavételezéssel) funkcionalitással. Mind az Androidon futó, mind a mérőkártyán lévő program tetszőlegesen testre szabható, így az aktuálisan felmerülő igényekhez igazítható.

2. Technológiai kitekintés

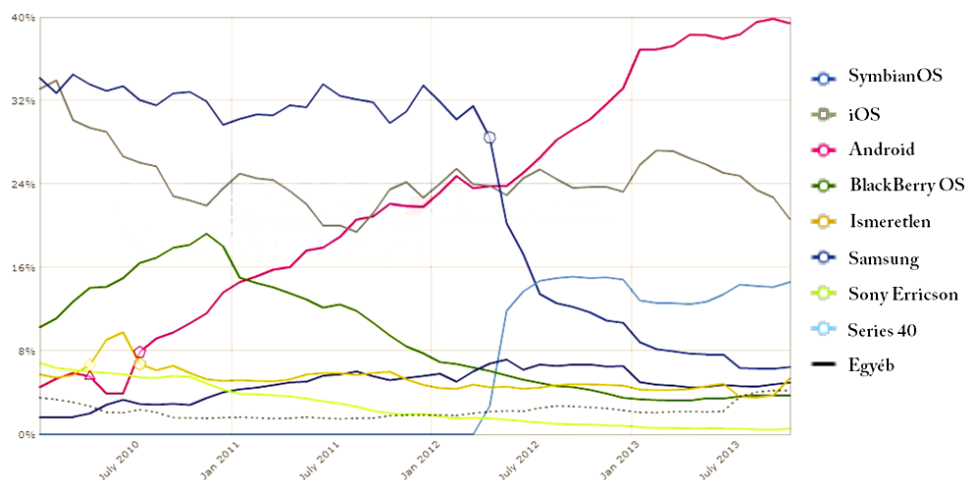
Okostelefonok terjedésének előnyei a mai világban új fejezetet nyithatnak a mikrokontroller alapú, alacsony fogyasztású eszközök alkalmazásában. Nagy felszereltségük miatt a jövőben nagy teljesítményű kézi eszközöknek alapjai lehetnek. Rendelkeznek alaplagra integrált grafikus processzorral (GPU - graphics processing unit), amellyel intenzív grafikai renderelés valósítható meg a mobilon. Több szálon futó, több magos processzorral szerelt okostelefonokon komplex számítási műveletek végezhetőek el, így egy modern hordozható kézi műszert olyan számítási teljesítménnyel tudunk felruházni, mint akár egy hétköznapi számítógépet [2][3].

Ahogy az okostelefonok népszerűsége növekszik és a gyártási költségei minimalizálódnak, úgy egyre jobban elérhetőek ezen eszközök szinte mindenki számára. Ez akár nyitánya is lehet rengeteg alkalmazásnak, akár az oktatásban, ahol alacsony költségvetésű interaktív oktatási célra alkalmas eszközöket tenne lehetővé.

A bevezetésben szó volt róla, hogy a mérnöki munka során elkerülhetetlen számos mérőberendezés használata. Egy mai laborban az oszcilloszkópot, jelgenerátort még mindig elég nagy "robosztus" méret jellemzi, miközben az elmúlt évek technológiai fejlődésének köszönhetően egy táblagéppel és egy kis mérőberendezéssel mindezeket ki lehetne váltani.

2.1 Android operációs rendszer

Az Android egy nyílt mobil operációs rendszer első sorban érintő képernyős mobil eszközökre (okostelefon, táblagép) tervezve. Létrehozásának a célja az volt, hogy egy olyan versenyképes mobil operációs rendszert fejlesszenek, amely képes a mobileszközök adta lehetőségeket maximálisan kiaknázni, mindezt egy teljes mértékben nyílt felületre építve. Az Android fejlesztői fontos szempontként tartják szem előtt azt, hogy egy igazán felhasználóbarát és rengeteg hasznos funkcióval felszerelt felületet biztosítsanak a felhasználók számára. Az Android nyílt forráskódú Linux kernelre épül. Ezen felül egyedi virtuális gépet is alkalmaz, melynek célja, hogy a lehető legjobban optimalizálja a memória és a hardver erőforrásokat mobil környezetben. Miután az Android nyílt forráskódú és szabadon terjeszthető, ezáltal lehetőség nyílik új és korszerű technológiák létrehozására is. A felület folyamatosan fejlődik a lelkes fejlesztői közösségnek köszönhetően, melynek eredménye újabb és újabb innovatív mobil alkalmazások létrejötte [4].



1. Ábra - Top 8 mobil operációs rendszer 2010 január - 2013 október között [1]

Az Android operációs rendszer 2010-es évtől kezdve egyre jobban terjed a mobil telefonok között, ahogy ezt az előző grafikon szemlélteti a Global Stats statisztikai kimutatása szerint. Az oldal egy web analízis során kalkulálja ki, hogy adott hónapban mennyi felhasználója van egy adott operációs rendszernek. 2013 októberi statisztikát nézve a honlap szerint az okos telefonok között a világon 40%-ban Android operációs rendszer fut [1].

Alkalmazások fejlesztése egyszerűen JAVA (SDK - Dalvik VM) vagy C/C++ (Natív kód, Java kódból elérhető - JIN) programozási nyelvben történhet. Hivatalos

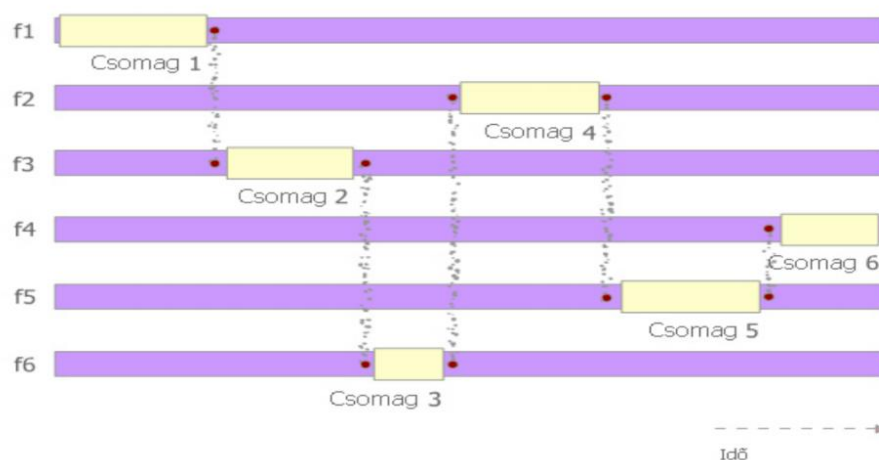
támogatott IDE az Eclipse. Lehetőség van a számítógépen az operációs rendszer emulálására (amely kicsit lassú), így telefon nélkül számítógépen letesztelhető a szoftverünk, illetve futtathatjuk közvetlenül telefonon is az alkalmazásunkat, amely gyors és kényelmes.

2.2 Bluetooth technológia

Sok esetben praktikus az eszközök vezeték nélküli összekötése. Akár egyszerű adatok átviteléről, akár két eszköz közti összetett kommunikációról van szó, esetleg ahol a vezetékes kapcsolat nem kívánatos vagy lehetetlen.

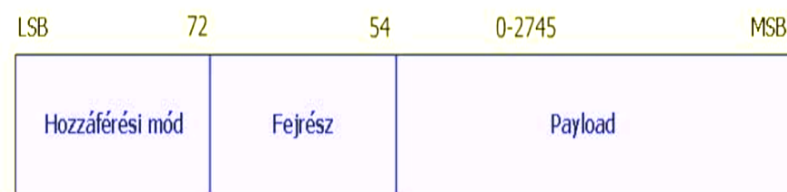
A Bluetooth egy rövid hatótávolságú, adatcseréhez használt, nyílt, vezeték nélküli kommunikációs szabvány. Alkalmazásával számítógépek, mobiltelefonok és egyéb készülékek között létesíthetünk kis hatótávolságú rádiós kapcsolatot. Egyszerű használhatósága, alacsony áramfogyasztása, kis mérete és nem utolsósorban alacsony ára miatt szinte a reneszánszát éli a vezeték nélküli mikroprocesszor alapú eszközökben. Bármilyen digitális eszközbe integrálható, főképp miniatűr illetve hordozható berendezésekben, ahol vezeték nélküli kommunikációra van szükség [5].

Több eszköz is használható egy teremben interferencia nélkül, mivel az eszköz 79 egyéni, véletlenszerűen kiválasztott frekvenciát (2,402 GHz - 2,480 GHz) használ, másodpercenként 1600-szor váltva egyikről a másikra. Mivel mindegyik eszköz automatikusan használja ezt a technikát, teljesen valószínűtlen, hogy két eszköz a másodperc 1600-ad részében ugyanazon a frekvencián kommunikáljon [5].



2. Ábra - Frekvencia ugrálás

Egymással kommunikáló eszközök között piko-hálózat alakul ki, ahol az eszközök összhangban kezdik a frekvenciaugrálást. Egy piko-hálózatban egy mester és 7 aktív szolga lehet. A mester meghatározza a csatornáját (saját ID) és az órajel fázisát. A szolga csak a mesterrel kommunikálhat, illetve azt is csak a mester engedélyével. Hálózat felépítésnél a szolga eltolja az órajelét úgy, hogy a mester eszköz órajelére tudjon szinkronizálni. Piko-hálózatok megszűnésével az órajelek visszaállnak [5].



3. Ábra - Csomag formátum

Bluetooth-os eszközzel a kommunikáció lehet egyirányú (half-duplex) illetve két irányú (full-duplex). A kommunikáció során küldött csomagok 3 részből épülnek fel: hozzáférési mód, fejrész és payload (adatrész). A hozzáférési módot időszinkronizálásra, frekvencia ofszet kompenzációra, keresésre használják. Fejrész tartalmazza a csomagazonosító információt, a csomagszámozást a csomagok újrendezése céljából, a folyamat kontroll biteit, a szolga címét és a hiba ellenőrző biteket, míg a Payload az adatátviteli biteket tartalmazza [5].

Egy Bluetooth eszköz 4 állapotban lehet: nyugalmi, lekérdező, kereső és kapcsolt. Nyugalmi állapotban csak az eszköz órája fut, nincs kapcsolat más eszközzel, így ez egy alacsony energiájú állapot. Lekérdező üzemmódban lekérdező csomagot küld és várja a választ. Kereső állapotban a forrás eszköz egy céleszközt keres. Kapcsolt állapotban a szolga eszköz összehangolta órajelét a mesterórával és rááll az FH csatornára. Ilyenkor a szolga minden üzenetsomagra válaszol [5].

A Bluetooth eszközök osztályuktól függően az alábbi távolságokon belül képesek kommunikálni:

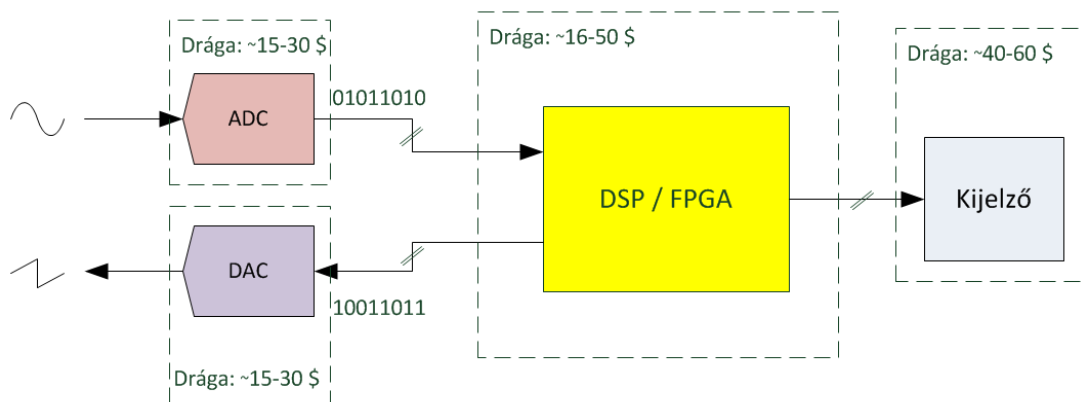
Osztály	Teljesítmény	Hatótáv
1	100 mW (20 dBm)	100 m
2	2,5 mW (4dBm)	10 m
3	1 mW (0 dBm)	1 m

A modern lakásokban (Smart-home), a gyors technológiai fejlődés miatt szinte minden berendezés között szükséges lehet a vezeték nélküli információ áramlás. Fűtés, légkondicionálás, szelőztetés, energiagazdálkodás mind automatizálható és a működtetésükhöz szükséges szenzorokhoz célszerű vezeték nélküli kommunikációt használni. Már elérhetőek olyan eszközök is, amelyek a működésükhöz szükséges energiát a környezetből nyerik (RF harvesting) és a Bluetooth kommunikáció alacsony fogyasztása miatt előszeretettel használják ezen a területen vezeték nélküli szenzorok kialakításában [6][7].

Hordozható, akkumulátorról táplált eszközöknél, mint például a sport, fitness és egyéb testen hordható eszközöknél egyszerű kapcsolódási lehetőséget nyújt az okostelefonhoz. Orvosi műszerekben, teszt mérőberendezésekben soros RS232-es kommunikáció kiváltására, beágyazott rendszerű robotok, önjáró járművek számítógép illetve okostelefonhoz való csatlakoztatásához elterjedten alkalmazzák.

2.3 Koncepció

Egy olyan mérőberendezésnél ahol egy analóg jel mérése és előállítása alapvető funkció ott fontos a sebesség. Mind az adatok feldolgozásánál és kiértékelésnél ez lényegi szempont. Ezért a digitális jelfeldolgozásnál elengedhetetlen nagysebességű AD és DA konverterek alkalmazása. Az AD/DA konverzió lebonyolításához, szükséges egy nagy sebességű (200-500 MHz) speciális processzor, DSP (Digital Signal Processor), amely nagy sebességű műveletekre van optimalizálva. A koncepcióm alapján, a következőkben bemutatok egy nagy sebességű (200 MSPS - 200 millió minta per másodperc / mega samples per second) mérőműszer elvi felépítését.

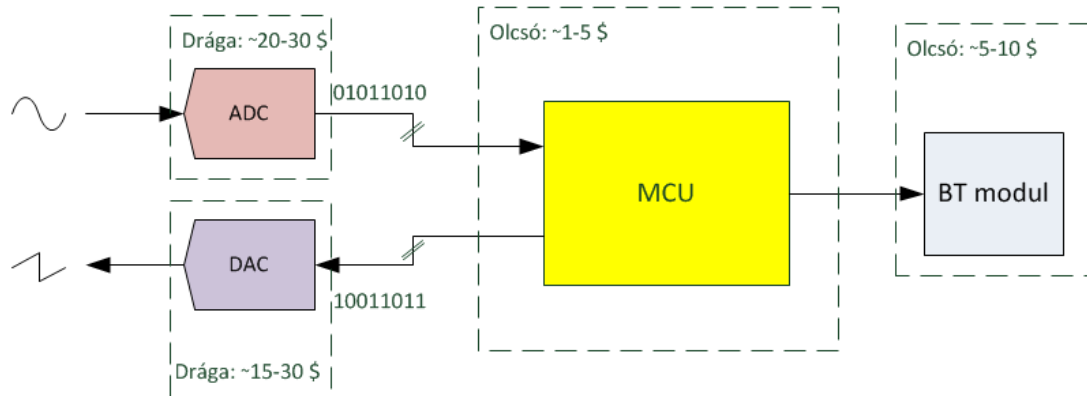


4. Ábra - 200 MSPS mérőműszer blokkvázlata

Nagy sebességű konverterek (165-300 MSPS) általában párhuzamos bináris csatlakozási felülettel vannak szerelve, így lehetőség van 1 órajelnyi idő alatt kiolvasni a konverzió eredményét. Ehhez a művelethez szintén egy nagy sebességű kontroller szükséges, mivel az órajel sebessége határozza meg a maximális mintavételi sebességet. Az adatok megjelenítése megoldható egy LCD kijelzővel, amely szintén nagy sebességű processzort igényel, ha egy használható, másodpercenkénti minimum 10-15 képfrissítés a cél. Belátható, hogy ezek az eszközök eléggé befolyásolják a komplett mérőműszer árát.

A mérőműszer kijelzőjének kiváltása egy okostelefonnal, mint intelligens eszközzel több okból is hasznos. Ezáltal az adatok megjelenítéséhez nincs szükség LCD kijelzőre, illetve nagy sebességű processzálási műveletekre. Ebben az esetben adatok kiértékelése történhet az intelligens eszközön, mint például digitális szűrés vagy valós idejű gyors Fourier transzformáció. Végezetül, ha megfelelő speciális konvertert

alkalmazunk, amely beépített memóriával és frekvencia sokszorozóval is rendelkezik, akkor véglegesen elhagyható a drága, gyors processzor alkalmazása. Ezáltal az általunk kidolgozott koncepció a következő blokk ábra szerint épül fel.

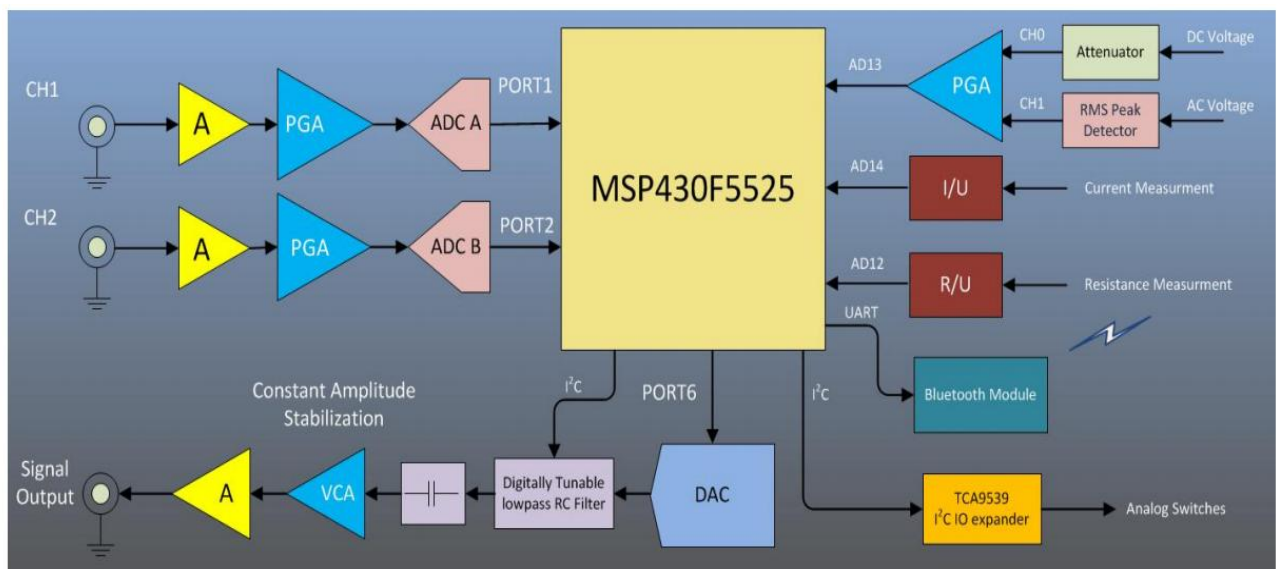


5. Ábra - Általunk tervezett mérőműszer koncepciója

A DSP processzort egy olcsóbb, lassabb, kisebb tudású mikrokontroller helyettesíti, melynek feladata a konverzió eredmények a tovább küldése az okostelefon felé. Ebben az esetben egy nagyobb tudású AD konverter szükséges, amely gondoskodik a nagy mintavételi sebességről.

3. Mérőműszer felépítése

A mérőműszer blokkvázlata a következő ábrán látható. A mérőműszer áramkörét fel lehet osztani 5 különálló modulra, amelyből két jelkondicionáló áramkör az oszcilloszkóp valamint a jelgenerátor funkcióhoz tartozik és három áramkör a multiméter funkcióhoz, mint feszültség, áram és ellenállás mérőkörhöz. A központi egysége az alaplapnak egy Texas Instruments által gyártott MSP430F5525 Mixed Signal mikrokontroller, amely ellátja a műszer alapvető funkcióit, mint például kommunikál Bluetooth-on az okostelefonnal, funkciót választ, kommunikál a panelon lévő áramkörökkel I²C, UART és SPI vonalon. MSP430-as kontroller megfelelt a szükséges kritériumoknak a mérőműszer specifikációs szakaszában, mivel olcsó, van energiatakarékos üzemmódja, amely egy későbbi akkumulátoros kiegészítésnél nagyon hasznos lehet, elég sok analóg és digitális IO csatornával rendelkezik, amely szükséges is volt a mérőműszer komplex struktúrája miatt, valamint nem utolsósorban nagyon egyszerűen és gyorsan lehet programozni (C/C++ nyelv). Az általam választott mikrokontroller a TI 16 bites kontroller kínálata között a leggyorsabb, 25 MHz-en fut és rendelkezik belső DMA modullal, amely segítségével meg lehetett valósítani, hogy az oszcilloszkóp funkció használatával párhuzamosan a jelgenerátor funkció is működjön.



6. Ábra - mérőműszer blokk vázlata.

A DMA (DMA - Direct Memory Access) vagy más néven közvetlen memória elérés egy olyan beépített modul a modern processzorokban, amely lehetővé teszi a rendszer

memória elérést bizonyos hardver alrendszereknek függetlenül a CPU-tól (Central Processing Unit - központi feldolgozó egység, processzor). Ha DMA nélkül a processzor adatokat mozgat (pl.: AD konverzió eredmény kiolvasása, adathalmaz küldése párhuzamos/soros vonalon), akkor teljesen elfoglalt az olvasási vagy írási művelet teljes időtartamára, így nem képes más munkát végezni ez idő alatt. Ha pedig rendelkezésre áll a DMA modul, akkor az adat mozgatás folyamatában a processzor más műveleteket is végezhet. Ha végzett a DMA, akkor azt egy megszakítással jelzi a processzornak. Ez a funkció nagyon hasznos, amikor például a CPU-nak valami fontos számítási műveletet kell csinálnia, amíg várakozik egy relatívan lassú I/O adat mozgatás alatt. Mindenképpen akkor hasznos, ha a sebesség nem elhanyagolható tényező egy adott feladat során.

Az MSP430-as mikrokontrollert megpróbáltam a lehető legnagyobb tudással felruházni speciális integrált áramköri alkatrészletek alkalmazásával. Ezért az oszcilloszkóp két bemeneti csatornájánál, nem a beépített AD konvertert használtam, hanem két külső párhuzamos AD konvertert (ADC08B200), amely rendelkezik egy 1 kb-os FIFO memóriával és frekvencia sokszorozóval, így a mikrokontroller 25 MHz-es órajelével akár 200 MSPS sebességgel is tudja mintavételezni a bemeneteket. Mind a két csatornához 1-1 párhuzamos AD konvertert alkalmaztam, így párhuzamosan is lehet mintavételezni a két bemenetet multiplexelés nélkül. A bemeneti jelkondicionáláshoz műveleti erősítő szintillesztés és programozható bemeneti jelerősítést terveztem.

A jelgenerátor funkció az MSP430-as kontroller DMA modulján alapszik. A kontrollerben egy előre definiált minta adat sort a memóriából a DMA írja az egyik kimeneti portra egy időzítő segítségével, felesleges szoftveres órajel ciklus nélkül, így a jelgenerálás teljesen független tud lenni a processzorban futó kódtól. Mivel a generált jel frekvenciáját nagyban befolyásolja a DA bemeneti digitális portjának frissítése, így egy párhuzamos DA konvertert választottam, a lehető legnagyobb mintavételi sebesség eléréséhez. Ezáltal 1 órajelciklusra 1 bájttal átvitele megvalósítható. A jelgenerátor funkciónál minél pontosabb, simább szinuszos jel előállítása volt a cél, így a DA konverter kimenetére egy jelkondicionáló egységet is terveztem, amely gondoskodik a megfelelő jelformálásról.

A multiméter funkciónál mind a három funkcióhoz (feszültség/áram/ellenállás mérés) készült 1-1 jelkondicionáló áramkör, amely gondoskodik a mikrokontroller

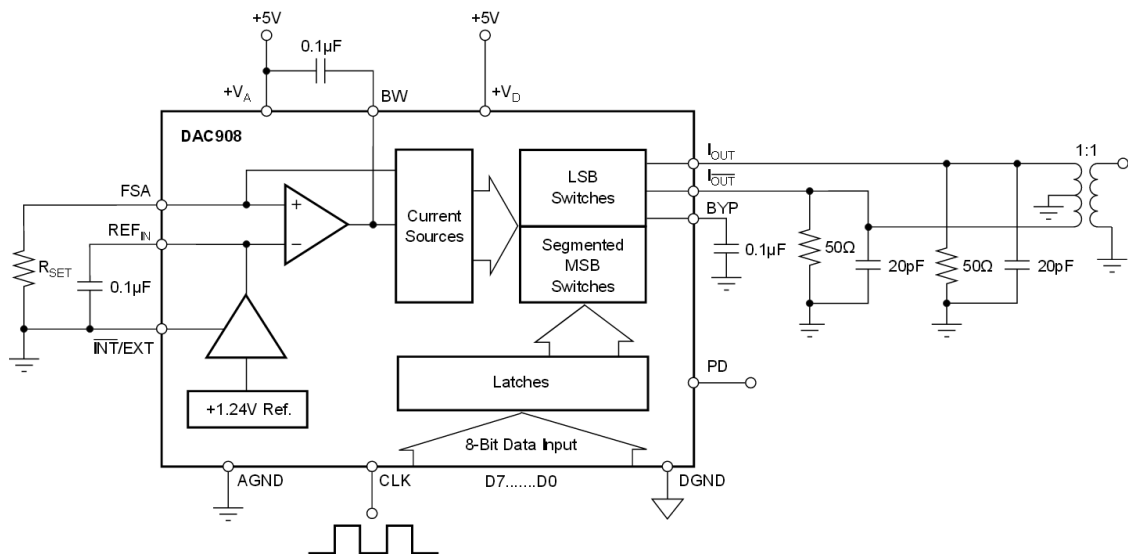
számára megfelelő jelszintek előállításáról. Mivel ennél a funkciónál nem volt kritikus a sebesség, így a mikrokontroller belső 10 bit-es AD konverterét használtam az AD konverzióhoz. DC és AC feszültségek méréséhez illetve a méréshatár váltáshoz szükség volt külső funkció váltó kapcsolókra, amelyet analóg kapcsoló integrált áramkörökkel valósítottam meg. A kapcsolókhoz szükséges IO csatornák minimalizálása végett egy I²C buszra fűzhető IO expandert alkalmaztam a kapcsolók vezérléséhez.

Az okostelefon és a mérőműszer között a kommunikációt egy (JY-MCU) Bluetooth/UART modullal oldottam meg.

3.1 Nagy pontosságú szinuszos hangfrekvenciás jelgenerátor kivitelezése

A legáltalánosabban használt diagnosztikai illetve tesztelő jelnek a szinuszos jelet tekinthetjük. Egy elektromos berendezés ellenőrzése és minősítése során, a ráadott szinuszos jel jelalak változását vizsgálják. IEEE szabvány alapján tesztelés során legfőképpen két fontos tényezőt vizsgálnak, mégpedig a teljes harmonikus torzítást (THD - Total Harmonic Distortion) és a jel-zaj viszonyt (SNR - Signal-to-Noise Ratio). Ezért a mérőműszer fejlesztése során jelgenerálás szempontjából egy minél simább, nagy pontosságú, alacsony zajú szinuszos jel előállítása volt a cél [8].

A jelgenerátor áramköre egy Texas Instruments által gyártott THS5641-es 8 bites, nagysebességű (165 MSPS) párhuzamos DA konverterre épül. Beépített referenciával rendelkezik, működtetéséhez 1-2 külső alkatrész szükséges. Kimenete 0-20 mA tartományban állítható áramforrás. 5 V illetve 3,3 V feszültséggel is működtethető. Felépítése a következő ábrán látható. 8 bites adat bemenetére kell megadni az átalakítandó bináris számot, melyet egy órajel impulzusra alakít át analóg jellé [9].

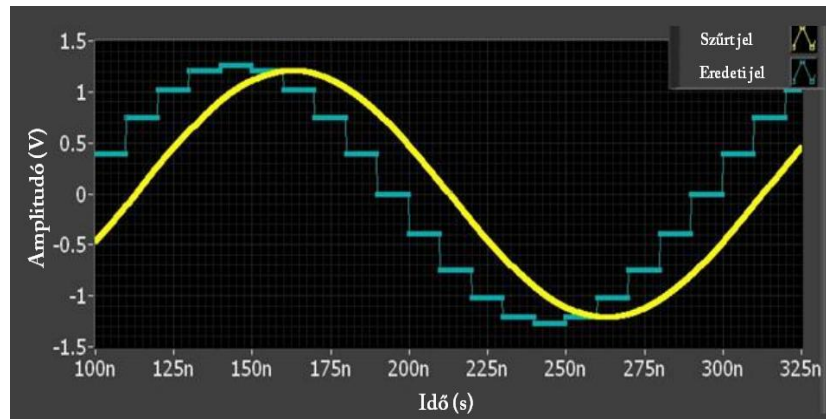


7. Ábra - DAC908 felépítése

Az MSP430-as kontroller belső DMA modulja szolgáltatja a megfelelő adatot a mikrokontroller memóriájából a DA konverter bemenetére. A DA konverter bemenetén az adatok frissítését a processzor egyik időzítője végzi, így a kimeneti jel frekvenciáját az időzítő paraméterezésével lehet beállítani. A mikrokontroller 25 MHz-en fut, a DMA

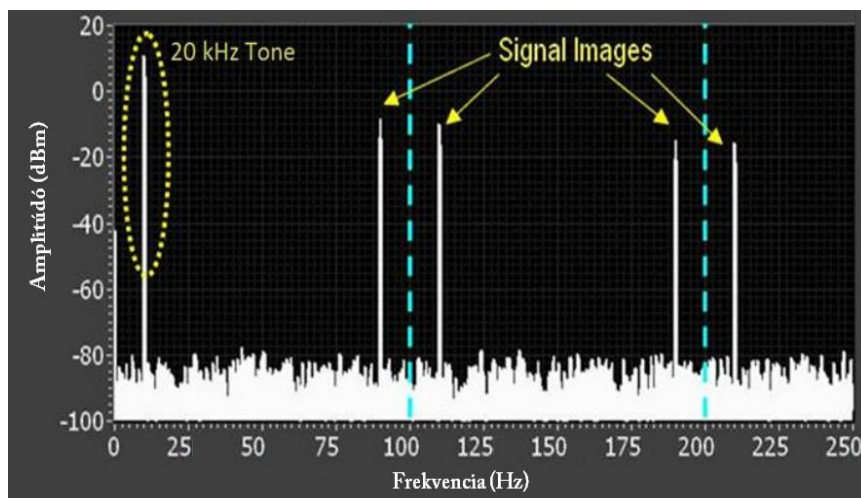
átviteli művelete 4 óraciklust igényel, így maximálisan 6,25 MHz-es mintavételi frekvencia valósítható meg. A periódusonkénti minta száma 40 így maximálisan 156 kHz-es szinuszos jel állítható elő.

Belátható, hogy a periódusonkénti negyven minta eléggé alacsony, a DA konverter kimenetén a jelalak nem lenne tökéletesen sima, hanem egy lépcsőzetes jel jelenne meg, ahogy az a 8. ábrán látható.



8. Ábra - DA konverter által generált jel és a szűrt jel összehasonlítása

A konverterben lévő nullad rendű tartó áramkörnek köszönhetően nagyfrekvenciás képek képződnek a mintavételi frekvencia minden többszöröse körül az alapjel frekvenciával $\pm$ irányba eltolva. Például, ha egy 20 kHz-es szinuszt állítunk elő 100 kHz-el mintavételezve, a frekvencia spektrumban képek találhatók 80,120,180,220 ... kHz-en. Az előző példát a következő ábra szemlélteti [10].



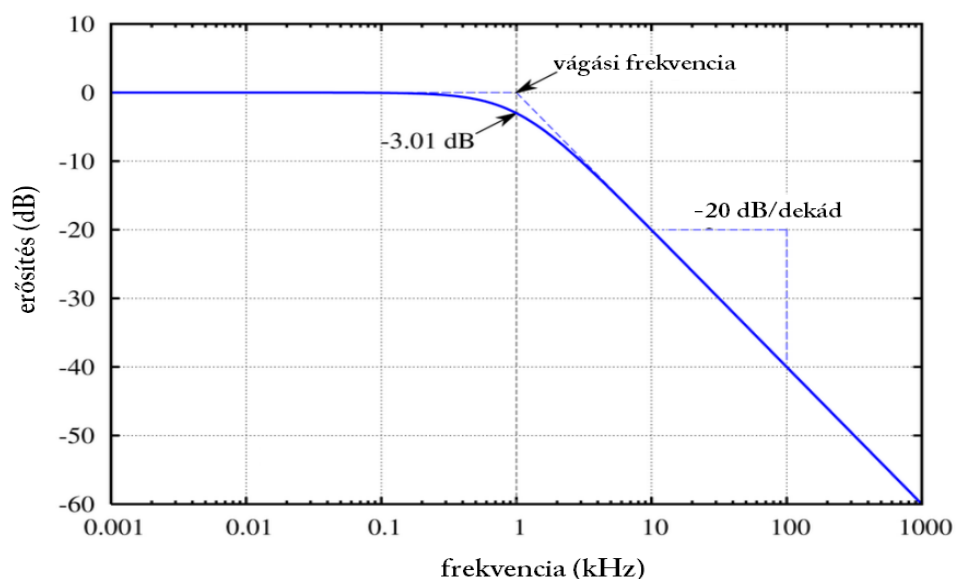
9. Ábra - DAC által előállított 20 kHz-es szinusz frekvencia spektruma

A generált jel nagyfrekvenciás komponenseit eltávolítva sima lépcsőmentes jelet kaphatunk, ahogy a 8. Ábrán látható. A szűrést egy analóg RC alul áteresztő szűrő kapcsolással oldottam meg.

A jelgenerátor jelkondicionáló áramköre nem csak egy alul áteresztő szűrőből áll. Mivel a kimeneti frekvencia hangolható, 1 Hz-től 156 kHz-ig, így egy fix frekvencián vágó alul áteresztő szűrővel nem kapnánk minden frekvencián ugyanolyan sima szinuszos jelet (mivel a generált nagyfrekvenciás képek minden frekvencián máshol képződnek). Digitális hangolhatóság érdekében az RC szűrő R tagját egy Analog Devices által gyártott I²C buszra fűzhető 8 bites AD5241 digitális potenciométerrel helyettesítettem. Az eszközzel hasonló működést lehet elérni, mint egy trimmer vagy potenciométer esetén. 10kohm, 100 kohm illetve 1 Mohm-os változatban kapható. Az ellenállás értékét 255 lépcsőben lehet beállítani. Működtetése külső alkatrészt nem igényel. DC feszültségek mellett, AC jelek is átvihetők rajta.

A digitális potenciométert felhasználva a vágási frekvencia szoftveresen állítható. Sajnos ennek a módszernek is vannak korlátai, a 255 ellenállás érték miatt. A működési tartomány összes frekvenciáján nem lehet ugyan olyan szűrést megvalósítani, de ha jól választom meg a vágási frekvenciát (alacsony f), akkor nagy sáv szélességben levágható a nagyfrekvenciás zavaró komponens.

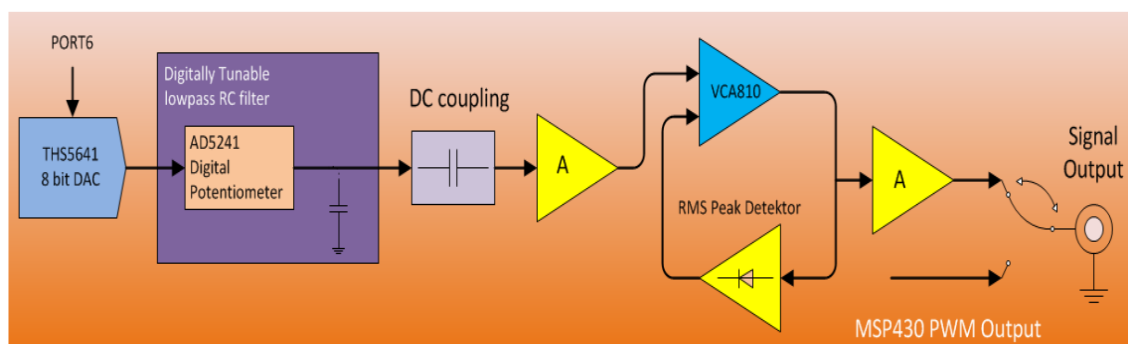
A következő ábra egy RC alul áteresztő szűrő frekvencia átviteli karakterisztikája látható.



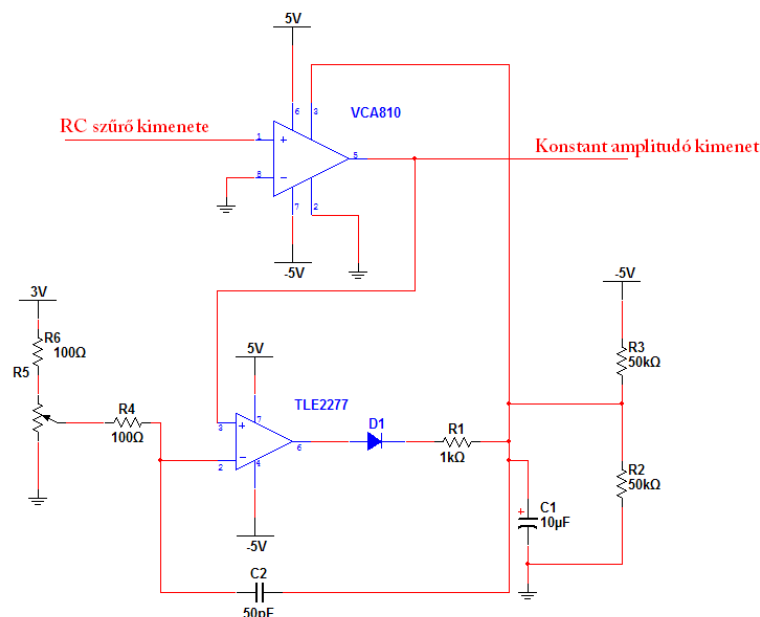
10. Ábra - alul áteresztő szűrő frekvencia átviteli karakterisztikája

A vágási frekvenciákat a működési tartományban (1 Hz - 156 kHz) 4-5 dekádban határoztam meg. Mivel az RC szűrő elsőrendű, ezáltal nem vág élesen, azaz a vágási frekvencia fölött -20 dB/dekáddal csökken a jel amplitúdó nagysága. A vágási frekvenciát az előállított jel frekvenciája alá kellett választanom, hogy teljes mértékben levágja a nagyfrekvenciás komponenseket. Például 10kHz és 80kHz kimeneti jel között 1kHz-es vágási frekvenciát állítottam be, amely biztosította a nagyfrekvenciás komponensek levágását ebben a tartományban. Belátható, az átviteli karakterisztika alapján, hogy ebben a tartományban a kimeneti jel amplitúdója elég nagymértékben változik. Az amplitúdó állandó szinten tartásának érdekében terveztem egy konstans amplitúdó stabilizáló áramkört, amely frekvenciától függetlenül állandó szinten tartja a kimenetet.

Az áramkör egy feszültség vezérelt műveleti erősítőből (VCA - Voltage Controlled Amplifier) és egy csúcs egyenirányító áramkörből épül fel. A feszültség vezérelt műveleti erősítőnek a Texas Instruments által gyártott VCA810-es IC-t választottam. Az integrált áramkör egyik lábán -2-0 V közötti feszültséggel lehet szabályozni ± 40 dB közötti erősítést. A szabályzást egy csúcs egyenirányító áramkör végzi, ahol a VCA kimenete vissza van csatolva egy műveleti erősítő nem invertáló bemenetére. Az invertáló bemenetére egy potenciométer van csatlakoztatva, ahol az alapjelet adhatjuk meg, azaz, hogy mekkora amplitúdó szintre szabályozza a kimenetet. A műveleti erősítő kimenetén egy dióda-kondenzátor páros gondoskodik a szinusz egyenirányításról, és az így kapott DC jel van a VCA feszültség szabályzó bemenetére kötve.

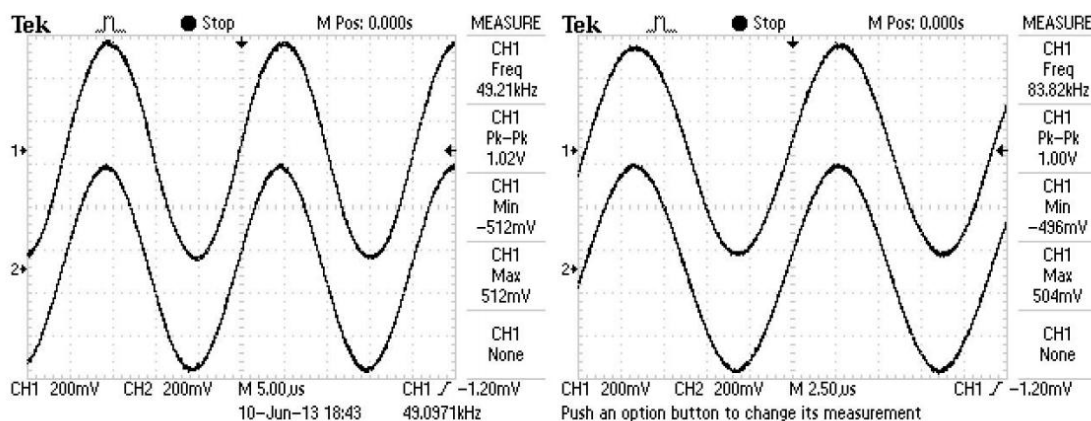


11. Ábra - Jelgenerátor felépítése



12. Ábra - Amplitúdó stabilizáló áramkör

A jelkondicionáló áramkör kimenetén nagyon sima, amplitúdó stabil szinusz jel állítható elő 1 Hz és 156 kHz között. Végeztem egy összehasonlító mérést oszcilloszkópon, hogy az általam tervezett áramkör milyen jelet állít elő egy *Hameg HM8030*-as funkció generátorhoz képest. Mind két mérőműszeren azonos amplitúdójú és frekvenciájú szinusz jelet generáltam, amelyet egy *Tektronics* oszcilloszkóp két bemeneti csatornájára kötöttem. Egy ~50kHz-en és egy 84kHz-en mért jel látható a következő két ábrán. Az egyes csatornán az általam tervezett mérőműszer jele látható a kettős csatornán a *Hameg* kimeneti jele.

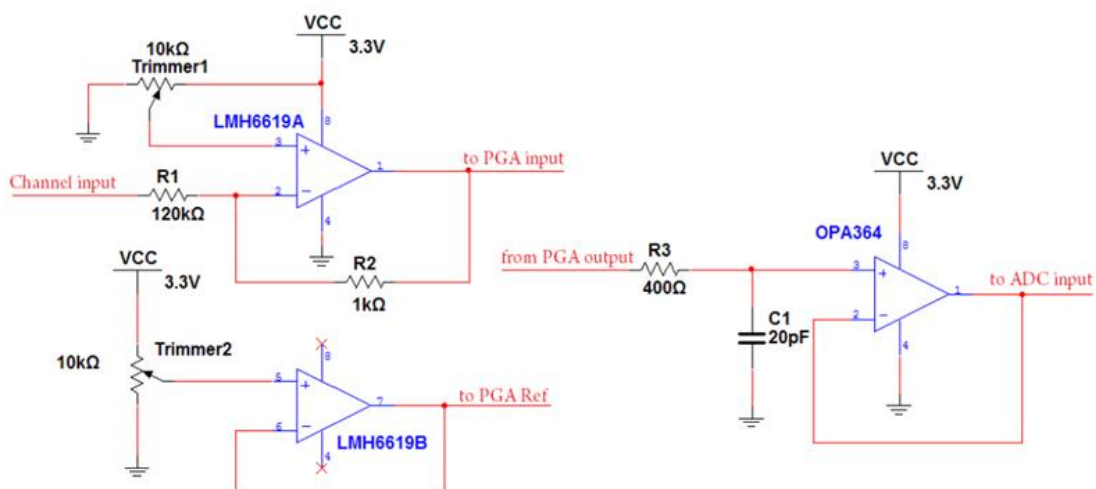


13. Ábra - Hameg HM8030 és a mérőműszerem kimeneti jele ~50kHz és ~84kHz-en

Látható, hogy nagyon hasonló, torzulás és zajmentes jel állítható elő, mint a *Hameg* jelgenerátor esetén.

3.2 Két csatornás tárolós oszcilloszkóp kivitelezése

Az oszcilloszkóp áramkör egy jelkondicionáló áramkorból és egy 8 bites nagysebességű (200 MSPS) ADC08B200 párhuzamos AD konverterből áll. Mivel az AD konverter negatív tápfeszültséget nem tolerál, illetve alacsony méréshatárral rendelkezik, így szükséges egy áramkör amely gondoskodik a bemeneti jel csökkentéséről és a jelszint eltolásáról. Negatív feszültséget, vagy AC jelet legegyszerűbben úgy lehet mérni, hogy létrehozunk egy virtuális földet, amely általában fél tápfeszültséget jelent és a bemeneti jelet ahhoz a jelszinthez képest mérjük. Így például egy $\pm 1\text{V}$ -os bemeneti jel egy $3,3\text{ V}$ -os áramköri táp esetén $0,65\text{--}2,65\text{ V}$ között lesz mérhető. Ha pedig a méréshatáron túli feszültséget kell mérni, akkor a jel nagyságát csökkenteni kell egy $A < 1$ erősítő kapcsolással. Mivel nagyságrendi különbségek lehetnek a bemeneti jelben ($\mu\text{V} - \text{V}$), ezért egy programozható erősítésű cél IC-t, PGA113 (PGA - Programable Gain Amplifier), alkalmaztam a jelkondicionáló áramkörben. Ezzel az IC-vel szoftveresen SPI vonalon lehet az erősítés nagyságát állítani. A PGA előtti bemeneti fokozatba LMH6619 (TI) műveleti erősítőt választottam. Alacsony zaj, nagy sávszélesség és rail-to-rail kimenettel rendelkezik, így megfelelt erre a célra. Az AD konverter meghajtásához OPA364-es (Burr Brown) műveleti erősítőt választottam, amely kitűnő kapacitív meghajtással rendelkezik és miniatűr SOT-23-as tokozásban is kapható. Az oszcilloszkóp bemeneti jelkondicionáló áramköre a következő ábrán látható. A jelkondicionáló áramkör mind a két csatornához megépült, így lehetőség van két jel vizsgálatára ugyanabban az időben a mintavételi sebesség csökkentése nélkül.



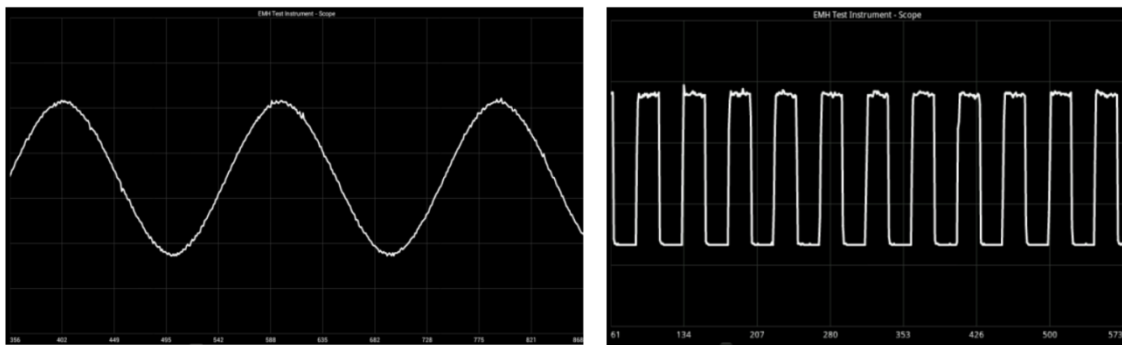
14. Ábra - Oszcilloszkóp bemeneti jelkondicionáló áramkör

A műszer bemenete egy invertáló erősítő kapcsolásra kapcsolódik, amely egy virtuális földhöz képest erősít. Az erősítése 0,083, amely megszabja a ± 20 V-os felső maximum határt. Az erősítő kimenete a PGA bemenetére kapcsolódik. A PGA IC-hez egy referencia feszültség szükséges, amelyet egy potenciométeres feszültség osztóval lehet beállítani. A próbapanelos tesztek alkalmával arra lettem figyelmes, hogy a PGA megterheli a feszültség osztót, így a referencia feszültség nem volt stabil, ezért egy követő erősítő illesztő fokozaton keresztül csatlakoztattam azt a PGA-ra. A PGA kimenetére került egy RC alul áteresztő szűrő, amely a mérőberendezés sávszélessége fölötti nagyfrekvenciás zajok szűrésére szolgál. A szűrőt 20 MHz-es vágási frekvenciára méreteztem. A szűrő kimenetére egy követőerősítő áramkör került az ADC meghajtásához.

A koncepciónk alapján, egy gyors (200-500 MHz) DSP nélkül nagy mintavételi sebesség elérése nem a legegyszerűbb. Elengedhetetlen egy párhuzamos bináris AD konverter alkalmazása, mivel ezzel a csatlakozási felülettel lehet kiolvasni a leggyorsabban (1 olvasási ciklus / adat, soros vonal esetén minimum 8 olvasási ciklus / adat). Ezzel a módszerrel a választott MSP430-as kontrollerral maximálisan 10-15 MHz-el lehetne mintavételezni az analóg jelet az IO csatornák frissítési sebessége miatt. Egy külső FIFO (First In First Out) memóriával a sebesség megnövelhető a processzor órajeléig, ahol az AD konverzió eredményét először a RAM-ba írjuk és a memória feltöltése után olvassuk ki a processzorba. Így 25 MHz-el lehetne mintavételezni a bemenetet. Nagyobb mintavételi sebességhez szükség van egy speciális áramkörre (PLL - Phase Locked Loop), amely lehetővé teszi a frekvencia sokszorozást. Ezekkel az áramkörökkel kiegészítve egy olcsó processzort elég nagy tudással lehet felruházni azt.

A Texas Instruments kínálatában van egy cél IC, ADC08B200, amelybe bele van integrálva mind a három funkció. Azaz, rendelkezik egy gyors párhuzamos portos AD konverterrel, belső 1 kBájtos FIFO RAM-al illetve egy frekvencia sokszorozó modullal (8x maximális szorzás). Ezzel az IC-vel felruházva a kontrollert 200 MSPS mintavételi sebesség is elérhető. Belátható, hogy így tárolós üzemmódban mér az oszcilloszkóp modul, 1024 mintavételezett pont után történik a kiértékelés.

A következő ábrán látható két képernyőmentés egy HTC Androidos telefonról, ahol egy 50 kHz-es szinusz és egy 400 kHz-es négyszögjel volt mérve.



15. Ábra - Mért 50 kHz-es szinusz és 400 kHz-es négyzetjel

Az oszcilloszkóp funkció 8 méréshatárral rendelkezik, amelyet a következő táblázatba foglaltam. Egy hagyományos oszcilloszkópon 8 függőleges beosztás található, így a vertikális felbontást ez alapján számoltam ki a maximális bemeneti jelből. Mivel az erősítés növelésével csökken a PGA sávszélessége, így azt is feltüntettem az alábbi táblázatban.

V/DIV	max bemeneti jel	bemeneti erősítés	sávszélesség
5	40 V	x 1	10 MHz
2	16 V	x 2	3,8 MHz
1	8 V	x 5	1,8 MHz
0,5	4 V	x 10	1,8 MHz
0,2	1,6 V	x 20	1,3 MHz
0,1	0,8 V	x 50	900 kHz
0,05	0,4 V	x 100	380 kHz
0,02	0,16 V	x 200	230 kHz

16. Ábra - Méréshatárok

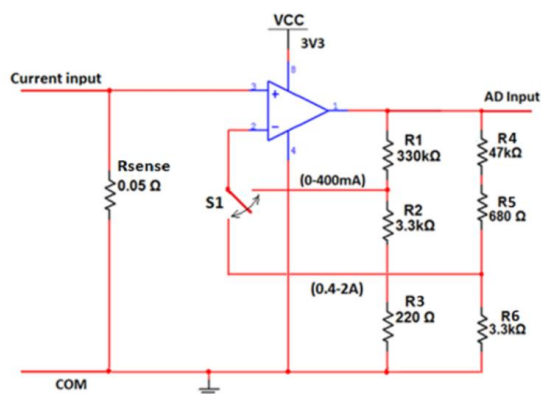
3.3 Multiméter funkció kivitelezése

Négy funkciót valósítottunk meg a multiméter modulban, mégpedig egy két méréshatáros DC 0-2 A árammérőt, egy automata méréshatár váltós 0-40 V DC feszültség mérőt, egy automata méréshatár váltós 0-40 V AC feszültség mérőt és egy automata méréshatár váltós $1\Omega - 3\text{ M}\Omega$ ellenállás mérőt. Három csatlakozó lett elhelyezve az alaplapon: zöld színű A/mA bemenet, kék COM csatlakozás és piros V/ Ω bemenet. A COM csatlakozó mind a négy áramkörnél a földre van kötve. A V/ Ω bemenetre egy analóg kapcsoló IC-n keresztül csatlakoznak az áramkörök. TS5A3159 és TS5A23157 SPDT analóg kapcsolókat alkalmaztam. A kapcsolók digitális kontroll lábait egy I²C buszra fűzhető TC9539 IO Expander IC-re kötöttem, hogy csökkentsem a szükséges mikrokontroller perifériák számát.

3.3.1 Két méréshatáros 0-2 A árammérő modul

Árammérésnél szükség van egy áram-feszültség átalakításra, mivel az AD konverzió általában feszültséget digitalizál. Ezt egy nagyon pontos, nagyon alacsony értékű ($0,05\text{--}0,005\ \Omega$) sönt ellenállással valósíthatjuk meg. Árammérésnél a mérőműszert sorosan kell az bekötni, ezáltal a sönt ellenállás aktív része lesz az áramkörnek. Ha az áramkörben áram folyik, akkor az ellenállás értékével arányos feszültség fog rajta esni. A kis ellenállás érték miatt kis feszültség ($\mu\text{V} - \text{mV}$) lesz mérhető, így ezt a jelet fel kell erősíteni. A felerősített jel egy AD átalakítóra kapcsolódik, majd a logikai kiértékelő feldolgozza azt.

Árammérő modul egy műveleti erősítő nem invertáló alapkapsolásra épül. A mérendő áramot egy sönt ellenálláson keresztül feszültséggé alakítjuk, majd egy erősítővel felerősítjük $0\text{--}3,3\text{ V}$ közötti értékre. Az ellenállásnak nagyon kicsinek kell lennie, hogy ne hamisítsa meg a mérést, mivel azt sorosan kell bekötni a mérendő áramkörben, így az ellenállás mérési hibát okozhat. Mivel a mérendő áramban nagyságrendi különbségek lehetnek ($\mu\text{A} - \text{A}$), ezért egy méréshatár váltó funkciót is kialakítottunk az áramkörben. Egy kapcsoló átkapcsolásával lehet méréshatárt választani, amely az áramkör erősítését változtatja. Egyik üzemmódban $0\text{--}400\text{ mA}$, másik módban pedig $400\text{ mA} - 2\text{ A}$ közötti áramot tudunk vele mérni. Az áramkör kimenete az MSP430F5525 processzor egyik 12 bit-es AD konverterére csatlakozik. A mért kalibrált kimeneti feszültség arányos a bemeneti árammal.

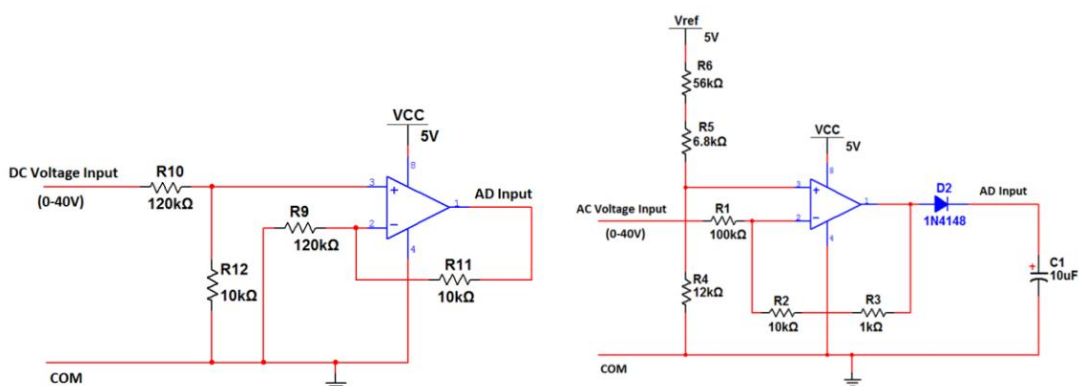


17. Ábra - Két méréshatáros 0-2 A árammérő modul

3.3.2 AC-DC Automata méréshatár váltós 0-40 V feszültség mérő

A feszültség mérésnél a mérőműszerre kapcsolt jel kondicionálásra kerül. Méréshatártól függően a bemeneti jel nagyságát valamilyen műveleti erősítő áramkörrel lecsökkentik, hogy digitálisan feldolgozható legyen. A jelkondicionált jel egy analóg digitális átalakítóra csatlakozik, amely után egy logikai kiértékelő számszerűsítve megjeleníti a mért feszültséget a kijelzőn.

A feszültség mérő modult úgy terveztük, hogy AC és DC feszültségek mérése is megoldható legyen, ezért két különálló áramkör készült a két funkció megvalósításához. Az egyik áramkör egy egyszerű fázist nem fordító műveleti erősítő alapkioscsolás, a másik áramkör pedig, egy műveleti erősítő egyenirányító kapcsolás. Mind két áramkörnél a bemeneti jel csökkentésre kerül sor, így 0-40 V közötti feszültség mérhető vele.



18. Ábra - DC feszültség mérő és AC feszültség mérő áramkör

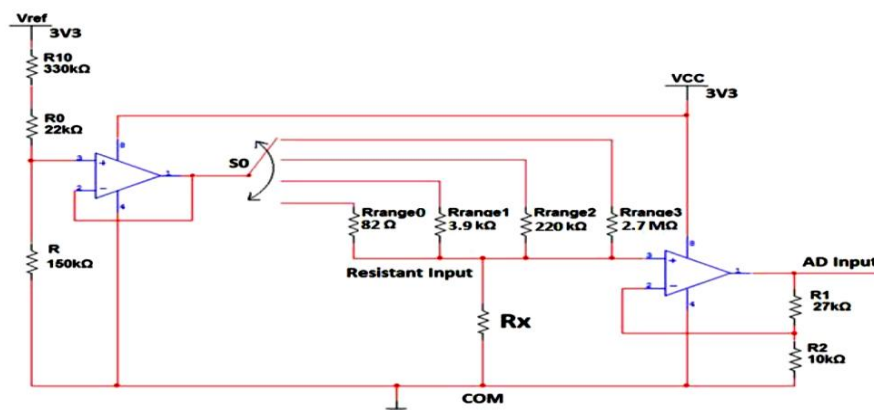
Az áramkörök kimenete egy PGA két bemenetére csatlakoznak. A PGA-n keresztül multiplexelve kiválasztható a mérési funkció SPI-on keresztül. A PGA nyolc fokozatban tudja erősíteni bemeneti feszültséget, így egészen kicsi μV -os feszültségek is mérhetőek.

A szükséges erősítést szoftveresen egyszerűen automata módon bel lehet állítani. Alapállapotban mindig a legnagyobb erősítést állítja be processzor (legkisebb méréshatár), majd ha nagyobb feszültséget kapcsolunk a bemenetre, mint az adott méréshatár felső értéke akkor a szoftver csökkenti az erősítést egészen addig, amíg a mérendő feszültség a mérési tartomány közepe körül nem lesz.

3.3.3 Automata méréshatár váltós 1Ω - $3\text{ M}\Omega$ ellenállásmérő

Ellenállás mérés is a feszültség mérésére vezethető vissza. Itt a vizsgálandó ellenállást párhuzamosan csatlakoztatjuk a mérőműszerhez. A multiméter egy konstans áramot folyat át az ellenálláson, amelyen feszültség lesz mérhető. Ezt a feszültséget szintén jelkondicionálja, majd AD konverzió után kiértékelő logika számszerűsítve megjeleníti a mért ellenállás értéket a kijelzőn. Méréshatártól függően más és más áramot folyat az ellenálláson, így Ω -os nagyságrendtől egészen $\text{M}\Omega$ -ig mérni tudjuk az ellenállást.

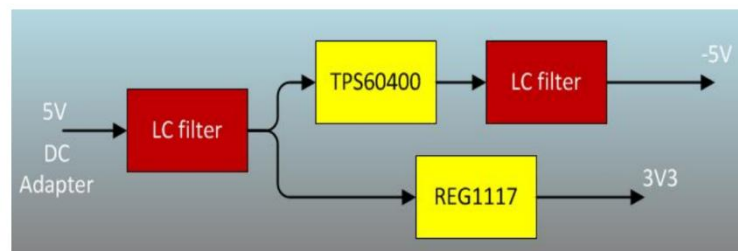
Az áramkör egy egyszerű feszültség osztó áramkörre épül, ahol az ismeretlen ellenállást egy mérhető feszültséggé alakítja. Méréshatár váltáshoz négy feszültség osztó került az áramkörbe, amelyek közül mindig egy kör kapcsolódik egy konstans feszültségre. A méréshatárt analóg kapcsolóval lehet kiválasztani. Az osztókör kimenete egy nem invertáló feszültség erősítő kapcsolásra csatlakozik.



19. Ábra - Ellenállás mérőkör

3.4 Tápegység kivitelezése

A mérőműszer működtetéséhez szükséges egy külső 5 V-os adatper. Egy későbbi fejlesztés alkalmával ezt kilehet váltani egy akkumulátorral, a mobilitás érdekében. Az áramkörök működtetéséhez az 5 V-on kívül 3,3 V és -5 V szükséges. A 3,3 V-ot egy TLV1117 egy analóg disszipatív feszültség stabilizátor IC állítja elő. Viszonylag nagy hatásfok és nagy kimeneti áram terhelhetőség jellemzi. A jelgenerátor kimeneti áramköréhez negatív feszültség is szükséges. A -5 V-ot egy TPS60400 kapcsoló üzemű feszültség inverter IC-vel állítottam elő. Sajnos az IC a kapcsoló üzemű működése miatt rengeteg zajt termelt a panelon, amely az oszcilloszkóp bemeneti csatornáján lévő jelet is torzította. A kapcsoló üzemű zajok szűrésére két LC szűrőt terveztem. Egyik közvetlenül a tápra csatlakozik, a másik pedig az inverter IC kimenetére. A TPS60400 kapcsoló frekvenciája 150-200 kHz közötti érték volt, így a vágási frekvenciákat, minél alacsonyabbra 2-5 kHz-re választottam. Az LC szűrők alkalmazásával, már elfogadható szintre csökkent az alaplapon a kapcsoló üzemű zaj.

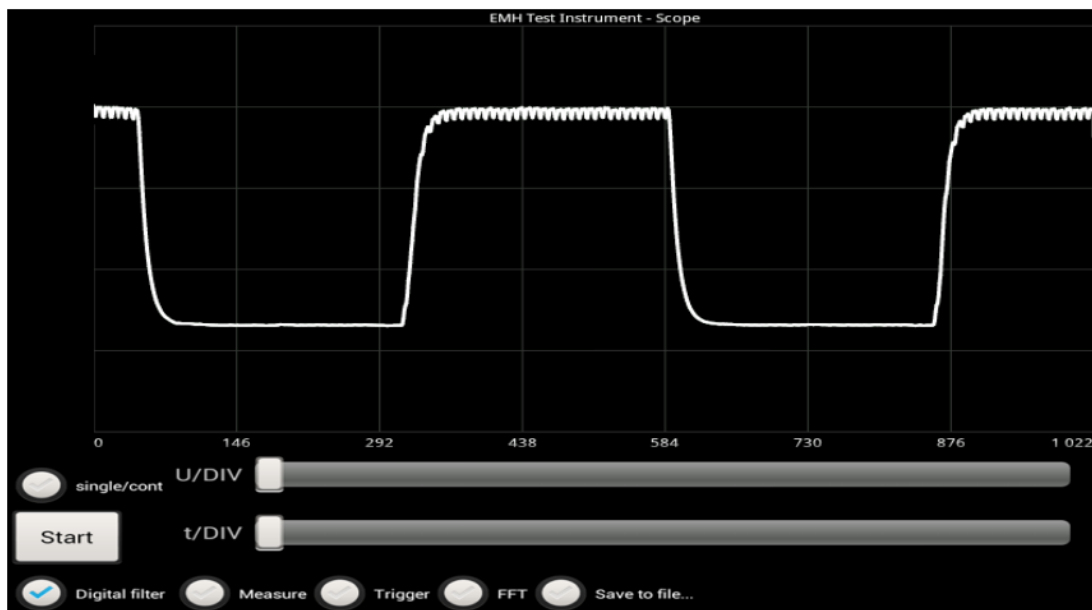


20. Ábra - Tápegység blokk vázlata

4. Androidos szoftver

Az elkészült prototípushoz írtam egy egyszerű Androidos szoftvert, amelyen a legalapvetőbb funkciók kipróbálhatók. Idő hiányában sajnos csak az oszcilloszkóp funkciót tudtam kidolgozni, így a következőkben azt részletezem.

Az alkalmazás Bluetooth segítségével csatlakozik a mérőműszerhez. A kommunikáció a telefon és a mérőműszer között egy egyszerű soros kommunikáción alapszik. A szoftver először mindig egy inicializáló műveletet végez, tehát beállítja a méréshatárt és a mintavételezési sebességet, majd elindít egy mérést. A processzoron futó szoftver ilyenkor 1024 mintában eltárolja a mért jelet a megadott mintavételi sebesség alapján, majd a mérés után ezt az adathalmazt elküldi a telefonnak. A telefon a mérési adatokat grafikonon ábrázolja, majd a beállított méréstől függően új mérést indít, vagy vár a következő mérés indítására. Folyamatos üzemmódban a mérési adatsor frissítési ideje körülbelül 1,5-2 másodperc. Az oszcilloszkóp Androidos kezelőfelülete a következő ábrán látható.

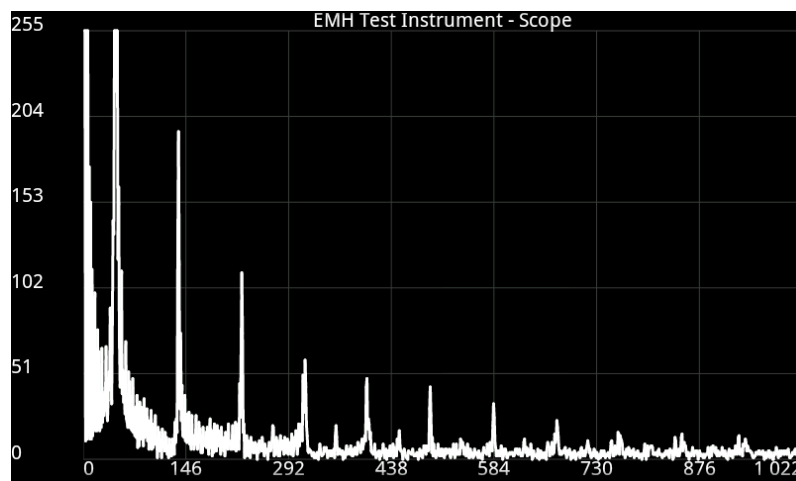


21. Ábra - Oszcilloszkóp kezelő felülete

Két vízszintes csúszkán lehet beállítani a vertikális és a vízszintes felbontást, amely a PGA erősítését és az AD konverzió mintavételi sebességét állítja. Egy funkciógomb kijelölésével lehetőség van egyszeri illetve folyamatos mérésre. Lehetőség van még felfutóél detektáló szoftveres triggerelésre, digitális szűrésre, jel

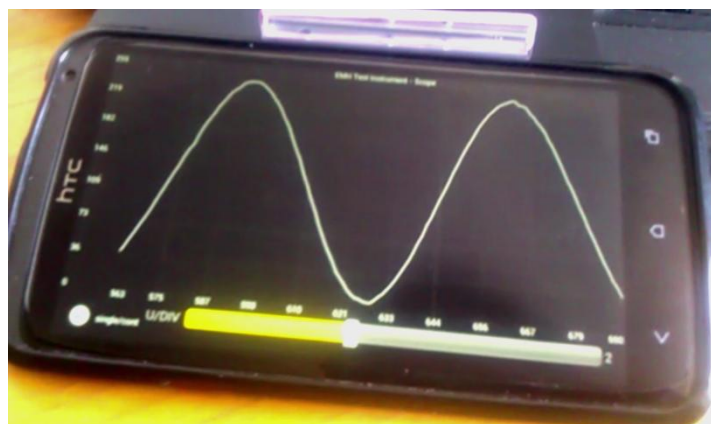
paramétereinek kiíratására (U_{p-p} , U_{max} , U_{min} , f), mérési adatsor mentésére illetve egy valós időben futó Fourier analízis vizsgálatra.

FFT gomb kiválasztásával lehetőség van valós idejű gyors Fourier transzformációs vizsgálatra. Ez a funkció nem lassítja le a mérést, mivel az okostelefon rendelkezik elegendő teljesítménnyel ahhoz, hogy elvégezze a szükséges kalkulációkat, amíg a mérőkártya mintavételezi a bemenetet. Egy ~ 50 kHz-es négyszögjel FFT képe látható a következő ábrán.



22. Ábra - 1022 mintából álló ~ 50 kHz négyszögjel FFT vizsgálata

A grafikonon ujj mozdulatokkal, a kirajzolt jel nagyítható, kicsinyíthető, illetve a meg nem jelenített részekhez görgethető. Ez nagyon egyszerű és gyors kezelést tesz lehetővé az érintő kijelzőn. A következő ábrán látható a szoftver futása egy HTC okostelefonon.



23. Ábra - Működés közben

5. Összefoglalás

A dolgozatomban bemutatásra került az általam fejlesztetett hordozható mérőműszer felépítése és a kivitelezésének a fázisai. A tervekből egy működő prototípus is készült. Tervezés során a jelgenerátor illetve az oszcilloszkóp funkció lett a lehetőségeknek megfelelően kidolgozva, a multiméter precízebb kialakításához további fejlesztések szükségesek.

Úgy gondoljuk, hogy rengeteg lehetőség van ebben a koncepcióban. Ez egy eléggé kiaknázatlan terület, a piaci kínálatában nem igazán található olyan berendezés mely vezeték nélkül tudna csatlakozni okostelefonokhoz vagy táblagépekhez. A műszer egy pár éves fejlesztés után akár a piacon is megállhatja a helyét. A mérőműszert egyszerűen és biztonságosan lehet csatlakoztatni a mobiltelefonokhoz, mivel nem igényel semmilyen kábeles összeköttetést vele, így egy hibás működés során az okostelefont nem károsíthatja.

Készült egy 3D-s koncepció is a mérőműszerről, amely a következő ábrán látható.



24. Ábra - Egy esetleges jövőbeli koncepció a komplett mérőberendezésről

5.1 Alkalmazási lehetőségek

A mérőműszer sok helyen megállná a helyét az alkalmazását tekintve. Egy hobbi célra használt mérőműszertől egészen egy labor mérés során használható mérőműszerig.

Egy pár alkalmazást említve, otthoni használatra praktikus, mert több műszer kerül egy lapkára, így nem kellene minden egyes mérőműszer megvenni, ezáltal pénz és hely takarítható meg vele. Viszonylag kis mérete miatt, könnyen hordozható, ha nincs használatban, a fiókban is elfér. Kompakt mérete miatt szinte bárhol használható, nem igényel számítógépet/laptopot a működtetése.

Labor munka során mérés közben a vezeték nélküli csatlakozásnak köszönhetően az okostelefon mint kijelző mozgathatóvá válik, anélkül, hogy egy adott mérést fel kellene függeszteni. Egy mérési eredmény kiértékelésénél ez előnyös, mert egy négy-öt fős csoportnál nem kell mindenkinek a mérőeszköz köré gyűlnie, hanem egyszerűen a telefon vagy tablet körbe járhat a kezekben. További előnye, hogy egy hosszabb mérés (stabilitás vizsgálat) összeállítása után, nem kell a mérőműszer előtt ülni, a Bluetooth hatótávon belül bárhol monitorozható a mérés.

Hangfrekvenciás erősítő tesztelése, javítása során egy mérőműszerrel előállítható egy 10 és 20kHz közötti teszt szignál, miközben a két csatornás oszcilloszkóppal visszamérhető a jel alakulása az erősítőben, ezáltal egy esetlegesen hibásan működő áramkör detektálható.



25. Ábra - EMH Test Instrument prototípus alaplappja

5.2 Jövőbeli tervek

Több ötlet is felmerült a további változatokat kidolgozásában. Készülhetne egy alaplap a multiméter funkciót kihagyva, vagy csak oszcilloszkóp funkciót megvalósítva. Készülhetne egy nagyobb mérőműszer is, amelyen egy kis karakteres kijelző visszajelezhetne 1-2 paramétert, illetve tervekben van egy több csatornás digitális bit analízátor funkció kidolgozása is. Nem utolsó sorban egy akkumulátoros változaton is gondolkodunk egy akkumulátor menedzsment áramkörrel kiegészítve, amely a töltöttségi szintet figyeli és a hálózati töltést is megoldja.

6. Irodalomjegyzék

- [1] Global Stats StatCounter, gs.statcounter.com
- [2] NVIDIA Inc., The benefits of multiple cpu cores in mobile devices, 2010
- [3] ARM Inc., The arm cortex-a9 processors, 2009
- [4] Open Handset Alliance: Android Overview, 2012
- [5] Brent A. Miller: Bluetooth revealed, , 2000
- [6] Emilio A., Raffaele B., Marco C.: The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges, Elsevier, 2013
- [7] Prusayon N., Rahman, D.M., Marco D.F., Kaushik C.: Device characterization and cross-layer protocol design for RF energy harvesting sensors, Elsevier, 2013
- [8] IEEE szabvány, 1631-2004, IEEE Standard for signal and test definition
- [9] <http://www.ti.com/product/ths5641>
- [10] National Instruments, Signal Generator Architecture - Analog Output to Advanced Features