

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Műszertechnikai és Automatizálási Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

ELEKTRONIKUS FOGYASZTÁSMÉRŐ ÉS REGISZTRÁLÓ FEJLESZTÉSE

Szerző: **Bognár Gábor**
Villamosmérnök BSc. szak, III. évf.

Konzulensek: **Molnár Zsolt**
egyetemi tanársegéd
Valkai Zoltán
mestertanár

Budapest, 2013.

1 Tartalom

2	MOTIVÁCIÓ	3
3	BEVEZETÉS.....	4
3.1	A villamos fogyasztásmérés történeti háttere	4
3.2	A villamos teljesítmény és fogyasztásmérés elméleti háttere	8
3.3	A villamos fogyasztásmérők felépítése	10
	Indukciós fogyasztásmérők	10
	Elektronikus fogyasztásmérők.....	11
4	ELVÁRÁSOK	12
4.1	Biztonságtechnikai elvárások	12
4.2	Felhasználói elvárások.....	12
5	A TERVEZÉS MENETE	14
5.1	A vonatkozó biztonságtechnika áttekintése	14
5.2	Funkcionális tervezés	14
5.3	Az alkatrészek kiválasztásának szempontjai	15
	A mikrokontroller kiválasztásának szempontjai.....	15
	Az AFE kiválasztásának szempontjai	17
	A kommunikációs modulok kiválasztásának szempontjai.....	19
6	A RÉSZÁRAMKÖRÖK ISMERTETÉSE	21
6.1	Tápegység.....	21
6.2	AFE és izoláció	22
6.3	Kommunikációs, és adattároló perifériák	25
6.4	Mikrokontroller, vezérlő áramkör.....	27
7	A PROTOTÍPUS GYÁRTÁSA	30
7.1	NYÁK tervezés, gyártás.....	30
8	MÉRÉSI EREDMÉNYEK	32
8.1	Az áramkörök funkcionális vizsgálata	32
	Tápfeszültségek vizsgálata	32
	Az SPI kommunikáció vizsgálata.....	34
8.2	Az áramkörök parametrikus vizsgálata	35
	A feszültségosztó osztásviszonyának meghatározása.....	35
	A söntellenállás értékének meghatározása	37

8.3	A készülék kalibrálása és besabályozása	38
	A feszültség és árammérés funkció kalibrálása és besabályozása:	39
	A teljesítmény és fogyasztásmérő üzemmód kalibrálása és besabályozása	41
9	SZOFTVERFEJLESZTÉS	43
10	FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK.....	45
11	ÖSSZEGZÉS	46
12	IRODALOMJEGYZÉK.....	47
13	MELLÉKLETEK	47
13.1	Kapcsolási rajzok	47

2 MOTIVÁCIÓ

A mai fejlett, kommunikációra épülő világban a különböző mért mennyiségek távoli elérésének, monitorozásának egyre nagyobb szerepe van. Ez a megállapítás igaz a közüzemi és ipari hálózatokon keresztül fogyasztott villamos- és hőenergiára, a víz és a földgáz mennyiségére is. A szolgáltatónak plusz költséget a fogyasztónak pedig kényelmetlenséget okoz a „leolvasás” folyamata, ezért az utóbbi időben elterjedőben vannak az elektronikus fogyasztásmérők, melyek különböző megoldásokat alkalmaznak a fogyasztási paraméterek távoli leolvasására és monitorozására. Ez a megoldás lehetőséget ad a szolgáltatói beavatkozásra, ilyen többek között a kapcsolt fogyasztói hálózat hatékonyabb, a napi terhelési görbéhez jobban illeszkedő vezérlése, vagy a rendezetlen egyenleggel rendelkező fogyasztók lekapcsolása a hálózatról.

Az intelligens fogyasztás- és teljesítménymérésnek, és a villamos hálózat egyéb paramétereinek monitorozásának az ipar más területein is nagy jelentősége van. Ilyen terület a gyártmánytesztelés, automatizálási és építőipari alkalmazások és a szórakoztató elektronika (színpadtechnika) területe.

Céлом egy olyan univerzális fogyasztásmérő és hálózat monitorozó készülék fejlesztése, amely képes a fogyasztási paraméterek mérésére és regisztrálására, és lehetőséget ad ezek távoli elérésére, valamint képes megvalósítani a távoli vezérlés funkciót vezeték és vezeték nélküli hálózaton egyaránt.

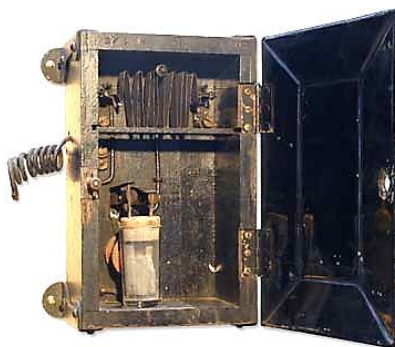
3 BEVEZETÉS

3.1 A villamos fogyasztásmérés történeti háttere

A villamos fogyasztásmérés a villamos energiaellátó hálózat elterjedésével, kiépülésével egyidős. A szolgáltatónak és a fogyasztónak is gazdasági érdeke fűződik a szolgáltatott és fogyasztott kereskedelmi célú villamos energia pontos méréséhez és regisztráláshoz. Így egyre fontosabbá vált, a fogyasztásmérők fejlesztése és gyártása is. Ezzel a megoldással korrekt számlázási rendszer vált kialakíthatóvá és a fogyasztóknak nem a használt lámpák száma után kellett fizetniük, hanem a felhasznált villamos energia után.

Az első villamos „fogyasztásmérők” a tengerentúli egyenáramú hálózatokon terjedtek és tipikusan elektrokémiai elven működő amper-óra számlálók voltak. Az első ilyen fogyasztásmérőt Thomas Alva Edison fejlesztette ki az általa tervezett egyenáramú hálózati fogyasztók mérésére. A készülékben egy pontosan ismert paraméterű elektrolízáló cella volt elhelyezve egy sönt ellenállással, amelyben az anód fogyásának mértékéből (tömegének csökkenéséből) lehetett következtetni a fogyasztott áram mennyiségére. Az elektrolízáló cellát adott időközönként eltávolították, az anód tömegét megmérték melynek csökkenése az adott időtartam alatt arányos volt a fogyasztott töltésmennyiség nagyságával¹.

Ez a megoldás azonban nagyon munkaigényes volt a szolgáltató részére és a fogyasztók részéről sem örvendett jó fogadtatásnak.



1. ábra: az Edison-féle horganyvoltmérő

¹ Michael Faraday első elektrolízis törvénye alapján

Az elektrokémiai elven működő amperóra-számlálók egy későbbi típusa az Egyesült Királyságban gyártott higanyos típus. Ebben a készülékben egy függőlegesen elhelyezett üvegcsővön halad keresztül a higany a cső tetején elhelyezett tároló edényből az üvegcső alja felé az átfolyó áram hatására. Amikor a tároló edény kiürült, azaz az össze higany az üvegcsőben gyülemlett fel készülék megszakította az áramkört. Ezután a szolgáltató munkatársának ki kellett nyitnia készüléket, vissza kellett töltenie a megfelelő higany mennyiséget a tárolóba, hogy a készülék tovább működjön.



2. ábra: Higanyszámláló

Az első pontos, a kereskedelemben is bevezetett amperóra számláló a Dr Hermann Aron által 1883-ben szabadalmaztatott típus volt. Amely a „higanymotort” és egy számlálószervezetet kombinált, így pontos leolvasást tett lehetővé mind a fogyasztó mind a szolgáltató számára. Emellett amennyiben a hálózati feszültség stabil volt, a mérési periódus alatt nem változott, a mért töltésmennyiség arányos volt a fogyasztó által felhasznált energiával is.



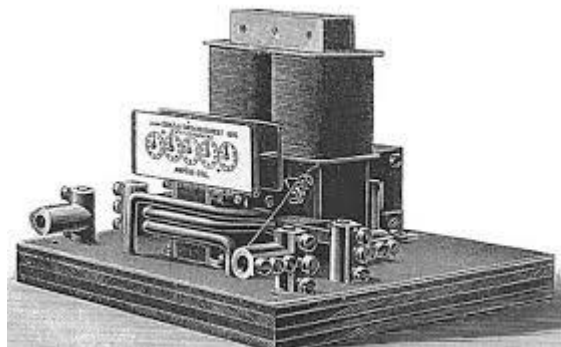
3. ábra: Dr. Hermann Aron szabadalma alapján készült egyenáramú amperóra számláló

Az első egyenáramú hálózaton működő, de módosításokkal váltakozó áramú hálózaton is alkalmazható wattóra-számlálót Elihu Thomson (1853-1907) mutatta be az 1888-as párizsi világkiállításon. Az általa fejlesztett készülék nagy bizonytalansággal működött és feltételezte, hogy a mérendő terhelés tisztán ohmos jellegű, azaz a rajta eső feszültség és a rajta átfolyó áram azonos fázisban vannak.

1883-ban a GANZ gyárban megszületett a Mechwart-Zipernowsky féle generátor, majd a Zipernowsky-Déri-Bláthy világszabadalma a pólus nélküli transzformátor. Ez lehetővé tette a váltakozó áramú villamos energia-elosztó rendszer kiépítését, ugyan akkor emiatt szükségessé vált egy váltakozó áramú hálózaton is működőképes fogyasztásmérő műszer fejlesztése is.

A váltakozó áramú fogyasztásmérők fejlesztésével Bláthy Ottó Titusz foglalkozott az akkori GANZ gyárban. Az általa fejlesztett fogyasztásmérő hajtóeleme egy Ferraris motor² volt, melyben vörösréz tárcsát alkalmazott, és a 90°-os fáziseltolás révén a hatásos teljesítményt mérte. Újszerű ötlet volt ezen felül a mágneses mellékszár vagy sönt alkalmazása is melynek segítségével a fluxus csak egy részét vezette át a forgórészen. Az első műszerek nagy helyigényűek és 20...15kg tömegűek voltak. Az első műszereket az 1889-es frankfurti vásáron mutatta be nagy sikerrel. Európában még ebben az évben, az USA-ban 1890-ben került szabadalmi oltalom alá találmánya.

² Galileo Ferraris (1847-1897) Olasz fizikus



4. ábra: Bláthy első fogyasztásmérőjének ceruzarajza (forrás:)

Bláthy a következő években továbbfejlesztette a mérőműszert, annak pontosságát függetlenítette a hálózati feszültség ingadozásaitól. Az új műszerek egyre könnyebbek kisebbek, és pontosabbak lettek. Az első világháború utáni fejlesztések eredménye képen jött létre a nagy sikerű Bd mérő melyből 2,5 millió darab készült. Ekkoriban a Bdf típusú mérő volt az egyetlen olyan típus, amely rendkívül könnyen csupán egyetlen szerszámmal annyira szétszedhető volt, hogy a sérült alkatrészek cserélhetőek legyenek, anélkül hogy a műszert ez után újra be kellene szabályozni.

Napjainkban általánosan alkalmazott az elektromechanikus elven működő mérőtípus mind egy mind három fázisú kivitelben, ipari és háztartási fogyasztói környezetben egyaránt. Ezen készülékek közös jellemzője a 6...8-szoros túlterhelhetőség és az alacsony indulási érték és a várható nagy (több 10 év) élettartam. Ugyanakkor elterjedőben vannak a tisztán elektronikus villamos fogyasztásmérők is. Ezek megbízhatósága és pontossága megközelíti az elektromechanikus mérők paramétereit, valamint lehetőséget adnak a szolgáltatók számára a távoli kiolvasásra, diagnosztizálásra, a kapcsolt fogyasztó hálózat hatékonyabb működtetésére és akár távoli beavatkozásra is. Ezek az eszközök tipikusan processzorvezérelt nagy pontosságú analóg-digitális átalakítók (a továbbiakban A/D átalakító) tartalmazó készülékek, amelyek megfelelő kommunikációs és kezelőfelülettel vannak ellátva a fogyasztók és a szolgáltatók részére, valamint képesek fogyasztás mérése és regisztrálása mellett a hálózat minőségi jellemzőinek teljes körű monitorozására is.



5. ábra: Ganz gyártmányú C114 és ACE2000 típusú elektromechanikus és elektronikus fogyasztásmérők

3.2 A villamos teljesítmény és fogyasztásmérés elméleti háttere

Egy tetszőleges, de korlátos időfüggvénnyel rendelkező periodikus jel RMS, azaz effektív értéke a következő összefüggés segítségével határozható meg:

$$j_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} j^2(t) dt}$$

A villamos áram vagy feszültség effektív értéke annak az egyenfeszültségnek vagy áramnak az értékével egyenlő, amely ugyanakkora munkát végezne az adott paraméterű fogyasztón, mint a vizsgálat tárgyát képző váltakozó áram vagy feszültség.

Váltakozó áramú, tisztán szinuszos jellegű hálózatok esetében a feszültség és az áramok a következő összefüggések segítségével írhatók fel:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_{RMS} \cdot \sin(\omega t + j)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_{RMS} \cdot \sin(\omega t)$$

Így a hálózatra felírható pillanatnyi teljesítmény értéke a következő összefüggés szerint alakul:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \varphi [1 - \cos 2\omega t] + U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \sin \varphi \sin 2\omega t$$

A hálózat hatásos teljesítményét P -vel jelölik, értéke a pillanatnyi teljesítmény egy periódusra vonatkoztatott középértékével egyenlő ahol a $\cos \varphi$ a teljesítménytényező, Ami egyenlő a fogyasztón eső feszültség és a rajta átfolyó áram közötti egy periódusra vonatkoztatott, szögben kifejezett fáziskülönbség koszinuszával.

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \varphi$$

A hálózat pillanatnyi teljesítményét meghatározó összefüggés második tagja a Q -val jelölt meddő teljesítmény, amelynek átlagértéke nulla. Megállapodás szerint a meddő teljesítmény ennek a maximuma.

$$Q = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \sin \varphi$$

Ezen kívül felírható az S -es jelölt látszólagos teljesítmény, amely a fogyasztón eső feszültség és a rajta átfolyó áram effektív értékének szorzatával egyenlő.

$$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

Ezekkel az összefüggésekkel felírható a komplex teljesítmény, ha az $\overline{I_{RMS}^*}$ áram az $\overline{I_{RMS}}$ áram komplex konjugáltja.

$$\bar{S} = \overline{U_{RMS}} \cdot \overline{I_{RMS}^*} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = P + jQ$$

Ebből következik, hogy a látszólagos teljesítmény $S = |\bar{S}|$, dimenziója [VA], ennek valós része a hatásos teljesítmény $P = \text{Re} \bar{S}$, dimenziója [W] valamint a meddő teljesítmény $Q = \text{Im} \bar{S}$ melynek dimenziója [Var]

A villamos energia vagy munka a teljesítmény idő szerinti integrálja ahol a t megfigyelési vagy vizsgálati időtartam.

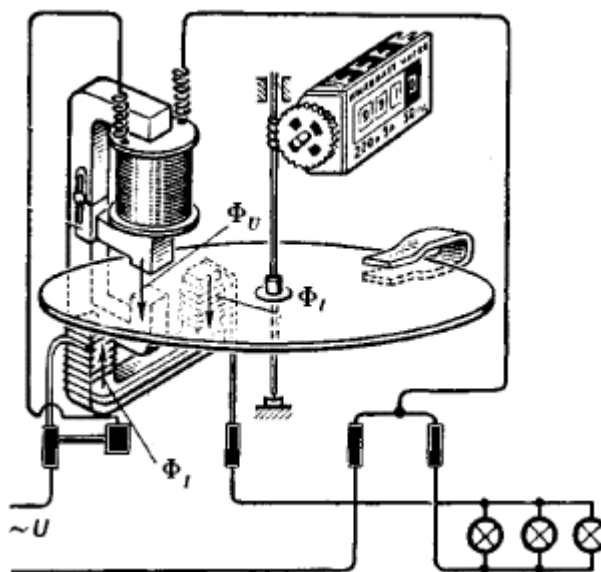
$$E = \int_0^t u \cdot i dt = \int_0^t p dt$$

3.3 A villamos fogyasztásmérők felépítése

A villamos energia definíció szerint a pillanatnyi villamos teljesítmény idő szerinti integrálja. Az olyan műszereket, amelyek a villamos energia mérésére alkalmasak általánosan fogyasztásmérőnek nevezik.

Indukciós fogyasztásmérők

Váltakozó áramú hálózatok esetében az energia mérésére leggyakrabban az indukciós elven működő fogyasztásmérőket alkalmazzák. Ezek alapeleme, egy speciális Ferraris motor, amely a fogyasztásmérők esetében kétfluxusú gerjesztést kap. Az egyik fluxust a fogyasztóval sorba kapcsolódó vasmagos áramtekercs, a másikat pedig a fogyasztóval párhuzamosan kapcsolódó feszültségtekercs hozza létre. A feszültség és áramtekercsek egymással bezárt síkszöge 90° így a fogyasztásmérő a határos teljesítményt méri.



6. ábra: Az indukció egy fázisú fogyasztásmérők általános felépítése

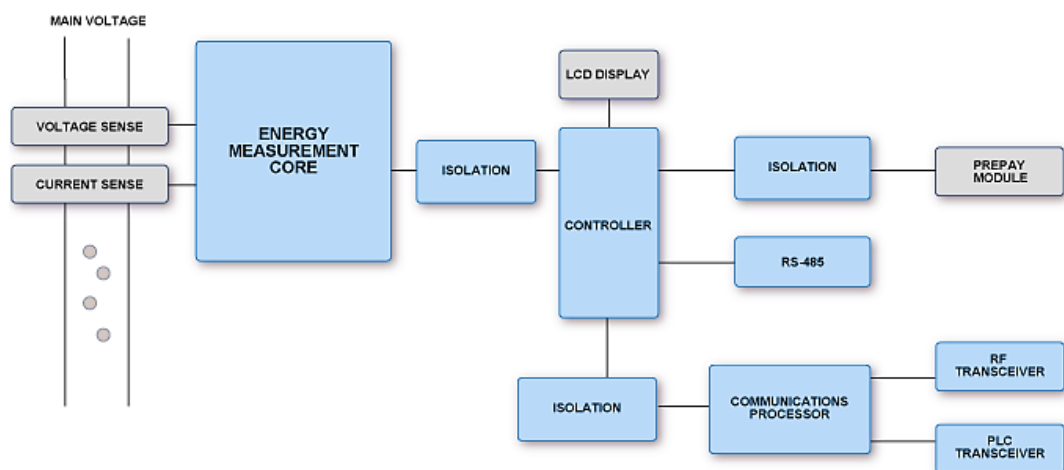
A fogyasztó feszültségének és áramának hatására létrejövő fluxusok eredője örvényáramokat gerjeszt a fogyasztásmérőben elhelyezkedő általában alumínium tárcsában, amelyek mágneses tere kölcsönhatásba lép a gerjesztő tekercsek mágneses terével. Ennek következtében a tárcsa elfordul, és az azt tartó tengely meghajtja a számlálóegységet. A tárcsa fordulatszáma pedig arányos a pillanatnyi teljesítménnyel.

Elektronikus fogyasztásmérők

Az elektronikus fogyasztásmérők felépítése nagyban különbözik az indukciós elven működő fogyasztásmérők felépítésétől. Ezek a készülékek tipikusan processzorvezérelt készülékek, mozgó alkatrészeket a minél nagyobb megbízhatóság és élettartam elérése érdekében csak a legkritikább esetekben tartalmaznak. Ez alól kivételt képeznek a belső megszakítóval vagy kontaktorrelével rendelkező típusok.

A feszültség és áram érzékelésére különböző szenzorokat alkalmaznak, melyek lehetnek egyszerű feszültségosztók, vagy feszültségváltók a feszültség-érzékelés esetében, sönt-ellenállások, áramváltók, hall-szenzoros nyílt vagy zárthurkú áramérzékelők. Ezek kimeneti jele tipikusan feszültség jel, amit A/D átalakítók segítségével digitális számértékké alakítanak. A feszültség és áramértékekhez tartozó egy adott pillanatra jellemző számértékek szorzata arányos a pillanatnyi villamos teljesítménnyel, így az eredményeket összegezve a fogyasztott villamos energiával arányos számértéket kapunk.

A digitális jelfeldolgozás fejlődése lehetőséget adott további paraméterek nagy pontosságú meghatározására is, így egy elektronikus fogyasztásmérő megfelelő hardver és szoftver segítségével teljes körű fogyasztási paraméter diagnosztika elvégzésére is alkalmas lehet. A bemeneti jelek feldolgozását és a fogyasztási paraméterek számítását tipikusan egy célprocesszor végzi, amely tartalmazhatja az A/D átalakítókat is. A kommunikációs, adatmegjelenítési és az egyéb funkciókat egy külön vezérlőprocesszor látja el.



7. ábra: Elektronikus fogyasztásmérők blokkvázlata

4 ELVÁRÁSOK

4.1 Biztonságtechnikai elvárások

Mivel a készülék 400/230 V-os kisfeszültségű hálózatról üzemel, ezért gondoskodni kell a megfelelő érintésvédelmi megoldások kialakításáról. Mivel a készülék egyes részei galvanikusan kapcsolódnak a hálózathoz meg kell oldani a kommunikációs, és az egyéb a felhasználók által elérhető részek elszigetelését. Ehhez izolált kommunikációs interfészekre és induktív vagy kapacitív izolációra van szükség.

Gondoskodni kell a készülék megfelelő túlterhelés, és túlfeszültség elleni védelméről mind a készülék védelmének érdekében mind tűzvédelmi szempontból.

4.2 Felhasználói elvárások

A készüléknek 230 V-os kisfeszültségű hálózatról kell üzemelnie. A rákapcsolt fogyasztó paramétereit 5%-os relatív hiba mellett kell tudnia mérni a 200...245 V-os hálózati feszültség és a 0,5...16 A-es terhelőáram tartományban. A túlterhelhetőségnek legalább a névleges áramérték 10-szeresének kell lennie. A túlfeszültséget, pedig 250 V-os hálózati feszültségig károsodás nélkül el kell viselnie. A mérendő paraméterek a következők:

- Hálózati feszültség és átfolyó áram,
- Pillanatnyi hatásos, látszólagos és meddő teljesítmények,
- A készülékre kapcsolt fogyasztói hálózat teljesítménytényezője
- A készülékre kapcsolt fogyasztó hálózat hatásos, meddő és látszólagos energia fogyasztása.

Ezekon a funkciókon kívül a készüléknek jelezni kell a következő eseményeket:

- Túlfeszültség és túláram
- Feszültségésés (SAG)
- Terhelésmentes állapot
- Kalibrációs adatok megváltozása

A készülék adatainak megjelenítését helyi LCD kijelző végezze, és rajta egyszerű a hálózati paraméterek megfigyelését lehetővé tevő kijelzés legyen látható, menürendszerbe szervezve.

A készülék legyen képes a helyi megjelenítésen kívül Ethernet hálózaton keresztül egy dedikált PC-vel kapcsolatot tartani, amely a rajta futó program segítségével képes ábrázolni a mért hálózati és fogyasztói paramétereket.

Ezen kívül a készülék adjon lehetőséget a fogyasztási és pillanatnyi teljesítmény adatok vezeték nélküli adatrádióon keresztüli kiolvasására is ilyen módon is megvalósítva a távoli monitorozás lehetőségét és rámutatva az intelligens adatgyűjtő hálózatok felhasználási lehetőségeire.

5 A TERVEZÉS MENETE

5.1 A vonatkozó biztonságtechnika áttekintése

Mivel a berendezés jelenleg fejlesztés alatt áll, ezért a végleges érintésvédelmi megoldások még nem kerültek kialakításra. Az elkészült alkatrészre további gyártás esetén a

- MSZ 2364 – Kisfeszültségű berendezések érintésvédelme,
- MSZ 171-1 – Villamos berendezések közös biztonsági előírásai, és életvédelmi osztályozás

szabványok és a kapcsolódó rendeletek lesznek irányadók.

Ezen felül, mivel a készülék szerkezetének, elektronikájának módosítása gazdasági érdekeket sért, ezért gondoskodni kell a külső szándékos és nem szándékos befolyásolásból valamint a belső hibákból eredő pontatlan mérések elkerüléséről és hibák detektálásáról is. Ehhez olyan készülékházat kell alkalmazni, amely magába foglalja a feszültség és áram érzékelő eszközöket, a számító, és vezérlő valamint a kommunikációs perifériákat és lezárása után csak roncsolásos módszerrel bontható meg. Ugyanakkor gondoskodni kell a szoftveres védelemről, is megfelelő hibadetektálási és hibakezelési megoldások alkalmazásával.

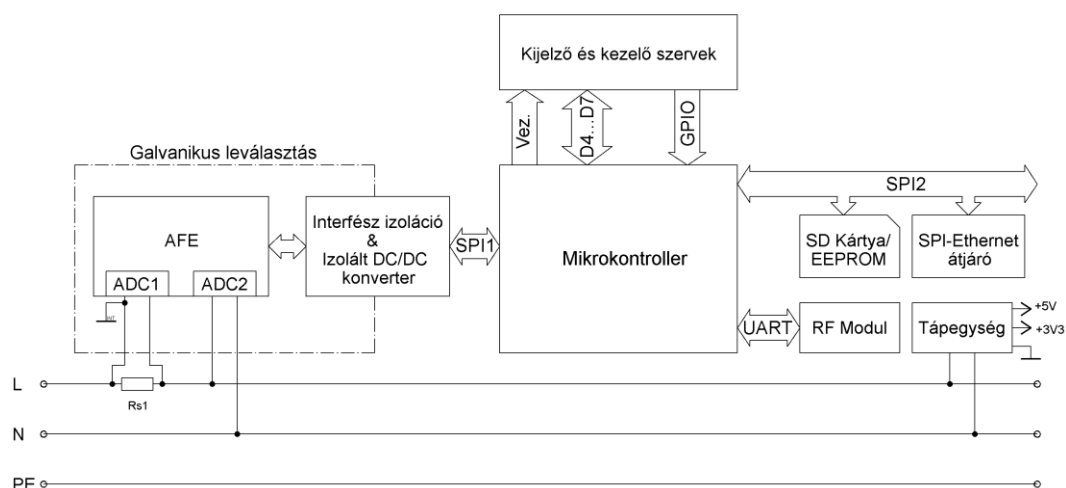
5.2 Funkcionális tervezés

A célok meghatározása után elkészítettem a készülék blokkvázlatát. A blokkvázlat tartalmazza az elvárásokat megvalósító különböző funkciókat ellátó blokkokat. Ezek a következők:

- Tápegység – a szükséges tápfeszültségek előállítása
- Mikrokontroller- a mikrokontroller felelős készülék vezérléséért.
- Interfész izoláció és AFE³ – a fogyasztás és teljesítmény mérést megvalósító célprocesszor és a hozzá tartozó elemek
- SD kártya és EEPROM – adatrögzítő és tároló funkció

³ AFE-Analog Front End – speciális analóg bemeneti fokozat, digitális vezérléssel

- SPI-Ethernet átváltó, RF modul – kommunikációs perifériák a távoli elérés, monitorozás megvalósításához
- Kijelző és kezelő szervek – a mérési adatok helyi kijelzése és navigálás a menürendszerben



8. ábra: A készülék funkcionális blokkvázlata

Ez után megkezdtem a különböző gyártók termékeivel való ismerkedést és kiválasztottam a kitűzött céloknak és az elvárásoknak legjobban megfelelő eszközöket, figyelembe véve a beszerezhetőséget, a gyártásba vihetőséget és a megfelelő ár-érték arányt.

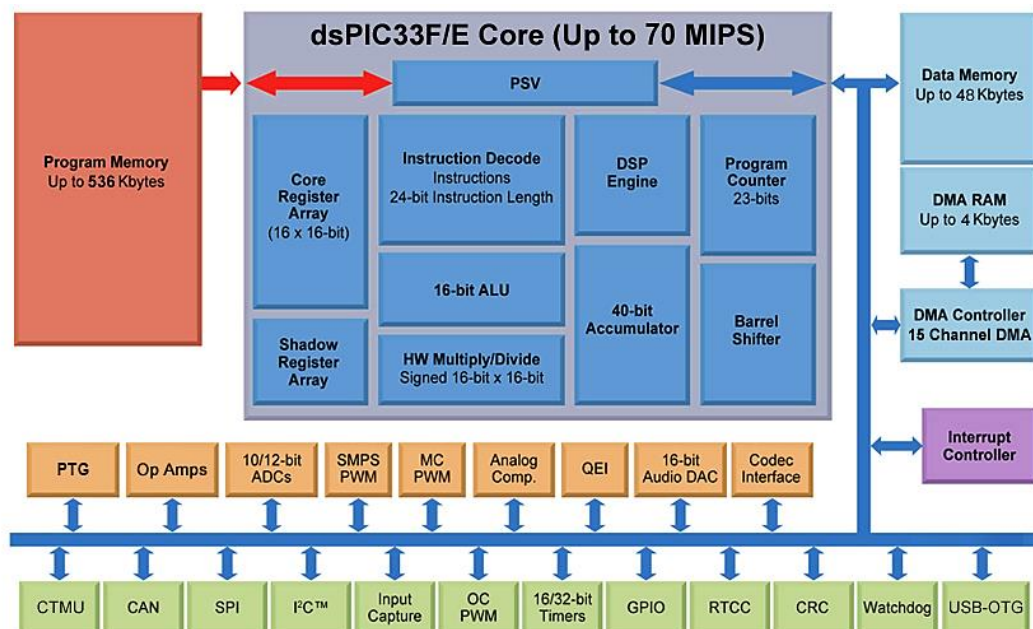
5.3 Az alkatrészek kiválasztásának szempontjai

A mikrokontroller kiválasztásának szempontjai

A mikrokontroller kiválasztásánál fontos szempont volt, megfelelő kommunikációs, időzítő és jelfeldolgozó perifériák, a megfelelő mennyiségű memória megléte, az alacsony fogyasztás és a megfelelő műveletvégzési sebesség. A választás ezen szempontok figyelembevételével esett a Microchip által gyártott dsPIC33EP256MU806⁴ típusú ma-

⁴ dsPIC33EP256MU806 - <http://www.microchip.com> mikrokontroller típus

gas minőségű DSP jellegű utasítások végrehajtására is képes 256 kbyte flash programmemóriával rendelkező típusra. A mikrovezérlő TQFP64⁵ típusú tokozásban foglal helyet, összesen 51 I/O kivezetéssel rendelkezik. Helyet kapott benne többek között 2 SPI⁶, 4 UART⁷, CRC⁸, DMA⁹ WDT¹⁰ és több bemenetű megszakítás kezelő modul is. Ezek a perifériák a PPS funkció segítségével különböző kivezetésekhez rendelhetők, így nagymértékben megkönnyítve a nyomtatott áramkör tervezését. Ugyan akkor ez a funkció és a tág perifériakészlet lehetőséget ad a további rugalmas fejlesztések elvégzésére ugyanazzal a processzorral és hardverrel.



9. ábra: Az alkalmazott mikrokontroller blokkvázlata (forrás:)

⁵ TQFP - Thin Quad Flat Package – vékony négyoldalú lapos tokozás felületszerelt kivitelben

⁶ SPI – Serial Peripheral Interface- Soros periféria illesztő busz

⁷ UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter – Aszinkron soros port

⁸ Cyclic Redundancy Check – Ellenőrző összeg generátor

⁹ Direct Memory Access – Közvetlen memória hozzáférés

¹⁰ Watchdog Timer – Speciális biztonsági időzítő modul, túlsordulásakor a mikrokontroller újraindul

Az AFE kiválasztásának szempontjai

Az AFE kiválasztásánál alapvető szempont volt a nagymértékű integráltság a minél több fogyasztási paraméter mérését lehetővé tevő kialakítás, és a könnyű beszerezhetőség. Napjainkban a legtöbb nagy félvezető gyártó forgalmaz saját fejlesztésű kifejezetten fogyasztás és teljesítmény mérési célra gyártott AFE integrált áramkört. Ezek közül a legelterjedtebbek a következő típusok:

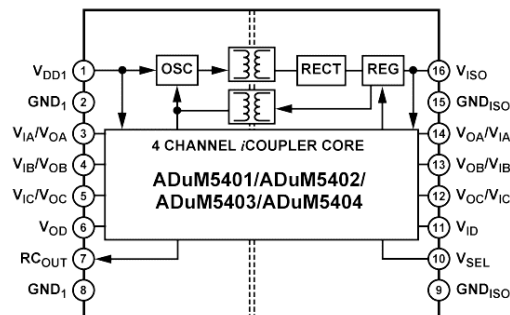
Gyártó	Típus	Mért paraméterek	Felső határfrekvencia	Felbontás	Kommunikációs periféria	Áramérzékelő
Texas Instruments	EVM430-FE427A	$I_{RMS}, U_{RMS}, S, P, Q, \cos\varphi, f$	1,5kHz	24bit	I ² C, SPI, UART	áramváltó, sőtellenállás
Analog Devices	ADE7953	$I_{RMS}, U_{RMS}, S, P, Q, \cos\varphi, f$	1,23kHz	24bit	I ² C, SPI, UART	áramváltó, sőtellenállás, dI/dt szenzor
Microchip	MCP3909	$I_{RMS}, U_{RMS}, S, P, Q, \cos\varphi, f$	1kHz	16 bit	SPI	áramváltó
Maxim	78M6613	$I_{RMS}, U_{RMS}, S, P, Q, \cos\varphi$	x	22bit	UART	áramváltó

A fenti típusok közül az Analog Devices ADE7953¹¹ típusú SoC¹² áramkörét választottam a kis mechanikai méret, a megfelelően nagy felbontás, és nagy szintű integráltság miatt. Ezeken felül fontos szempont volt a több kommunikációs lehetőség és a több féle áramérzékelő csatlakoztatásának lehetősége is, valamint az hogy a típus a lehető legkevesebb, nagy pontosságú külső alkatrészt igényel a nagy pontosságú működéshez.

Az AFE lehetőséget ad az összes hálózati paraméter nagy felbontású adatainak kiolvasására, képes szenzorok okozta fázistolás kompenzálására, bemeneti offset és erősítés kompenzálásra. Ezen funkciók segítségével kalibrálás után könnyen beszabályozható a készülék az elvárt pontossági paramétereknek megfelelően.

¹¹<http://www.analog.com/>

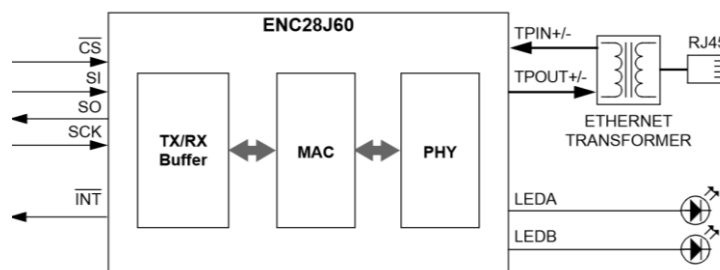
¹² SoC – System On Chip – nagy integráltságú analóg és digitális jelet is fogadó célprocesszor



11. ábra: Az alkalmazott izolált DC-DC konverter és interfész izolátor blokkvázlata

A kommunikációs modulok kiválasztásának szempontjai

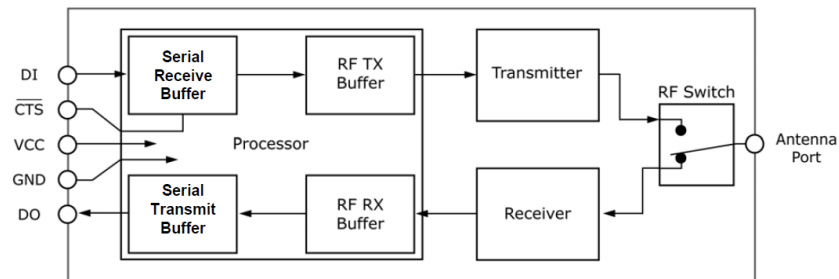
A kommunikációs modulok kiválasztásánál a fő szempont a magas integráltság és az egyszerű konfigurálhatóság volt. Az SPI-Ethernet átvérő esetében a Microchip ENC28J60 típusú termékével szerelt modult választottam, mivel ezen gyárilag megtalálható az Ethernet leválasztó transzformátora, és RJ-45-ös csatlakozója valamint az IC működéséhez szükséges rezonátor és az egyéb jelkondicionáló elemek. A működéshez a modult elegendő az SPI buszra csatlakoztatni, valamint a megfelelő parancsok segítségével felkonfigurálni.



12. ábra: Az ENC28j60 Ethernet-SPI átvérő blokkvázlata

Az RF modul kiválasztásánál a legfőbb szempont a kommunikáció transzparens működése és nagy áthidalható távolság volt. Erre a feladatra a Digi International által gyártott XBee PRO2 típusú 2,4GHz-es nagy hatótávolságú adatrádió modulokat választottam ki. A modulok képesek titkosított adatátvitelre, felprogramozhatók üzenetszórásos és címzett kommunikációra, valamint az egyes modulok definiálhatók végponti eszközként, forgalomirányítóként és koordinátorként is, így használatukkal és megfelelő szoftveres meg-

oldásokkal létrehozható egy intelligens vezeték nélküli adathálózat. A modulok konfigurálásához a Digi International X-CTU szoftverére és egy USB-UART átalakítóra van szükség. A megfelelő firmware feltöltése után a modulok címe, neve beállítható és megadhatók az egyéb hardveres funkciók, például, az adatforgalom jelzése egy I/O kivezetés segítségével.



13. ábra: Az XBee PRO2 adatrádió modul funkcionális blokkvázlata

6 A RÉSZÁRAMKÖRÖK ISMERTETÉSE

6.1 Tápegység

A tápegység feladata a megfelelő 3,3 V -os és 5 V-os tápfeszültségek előállítása a 230 V-os hálózati feszültségből, és elegendő áramerősség szolgáltatása a különböző rész-áramkörök számára. A kimeneti feszültségének zajtartalma és ingadozása nagymértékben befolyásolhatja a készülék működését és a mérések pontossági paramétereit.

A 230 V-os hálózatra az X3 jelű csatlakozón keresztül kapcsolódik a készülék. A hálózati transzformátor primer tekercsével egy 63 mA névleges kioldási áramú olvadó biztosíték kapcsolódik sorosan, amely gondoskodik a transzformátor primertekercsének túláram-védelméről, menetzárlat, szekunder oldali zárlat, vagy 250 V-nál nagyobb túlfeszültség esetén. A készülék hálózati túlfeszültség elleni védelmét a transzformátor primer tekercsével párhuzamosan kapcsolt 250 V névleges vizsgálófeszültségű varisztor és a soros olvadó biztosíték látják el.

A transzformátor szekunder tekercsével egy Graetz-kapcsolású diódahídból és alacsony soros ellenállású elektrolit pufferkondenzátorból álló csúcsegyenirányító kapcsolódik. A csúcsegyenirányító kimeneti feszültségéből az LM2575 típusú standard kapcsolóüzemű feszültségszabályozó állítja elő az 5 V-os logikai tápfeszültséget az LCD kijelző számára. A feszültségszabályozó kiválasztásánál fontos szempont volt magas hatásfok és a megfelelő szabályozási tulajdonságok megléte. A kapcsolóüzemű stabilizátort egy 3,3 V-os analóg feszültségszabályozó követi, amely a mikrokontroller az AFE és a kommunikációs perifériák számára állítja elő a megfelelő értékű logikai tápfeszültséget. A 3,3 V-os stabilizátor kiválasztásánál elsődleges szempont volt jó értéktartási tulajdonság a túláram és a túlmelegedés elleni védelem. A zavaroszűrésről a feszültségszabályozók és az egyéb integrált áramkörök közvetlen közelében elhelyezett jelkondicionáló kondenzátorpárok gondoskodnak. Ezek egy 10 μ F kapacitású, tantál elektrolit és egy 100 nF kapacitású nagy veszteségi tényezővel rendelkező kerámia dielektrikumú kondenzátorból állnak. Előbbi az alacsonyfrekvenciás ingadozások simításáért, utóbbi a nagyfrekvenciás zavarok elvezetésért felelős. További szűrőelemként szerepel a kapcsolásban a kapcsoló-

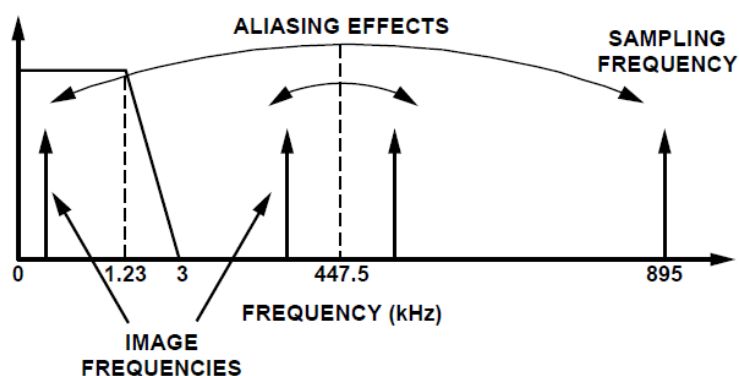
üzemű 5 V-os és a folyamatos működésű 3,3 V-os szabályozó között az L10 jelű induktivitás, amely a kapcsolóüzemű működésből származó nagyfrekvenciás zavarjel értékét csökkenti.

6.2 AFE és izoláció

Az AFE kiválasztásánál alapvető szempont volt a megfelelő pontossági paraméterek kiválasztása és a nagyfokú integráltság. A választott áramkör az Analog Devices ADE7953 típusú cél DSP-t tartalmazó teljesítmény és energiamérésre kifejlesztett nagy pontosságú integrált áramköre.

Az AFE és kiegészítő áramköreinek tervezésekor különös figyelmet fordítottam az alacsony mérési bizonytalanság eléréséhez szükséges alkatrészek és kapcsolások méretezésére és kiválasztására. Így a feszültségmérő bemeneten elhelyezkedő feszültségosztó ellenállásai alacsony tűrésű és azonos hőmérsékletfüggésű típusok, így a környezeti hőmérséklet változása csak kis mértékben befolyásolja a feszültségosztó osztásviszonyát. Az analóg digitális átalakító bemenetein elhelyezkedő átlapolódás-mentesítő szűrők kapacitásai magas nagyfrekvenciás veszteséggel rendelkező ugyanakkor alacsony hőmérsékletfüggésű típusok, így az átlapolódás-mentesítő szűrők töréspontja csak kis mértékben függ a hőmérsékletváltozástól.

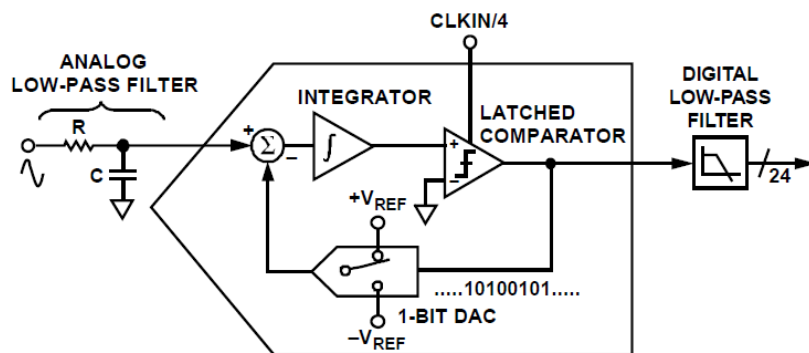
A megfelelő jel-zaj viszony elérésének érdekében az AFE digitális és analóg földpontját egy induktivitással szigeteltem el egymástól nagyfrekvenciás szempontból. Ez által a magas frekvenciás digitális működésből eredő zaj kis mértékben befolyásolja a mérési eredményeket.



14. ábra: Az átlapolódási jelenség ábrázolása (forrás:)

Az AFE nagy felbontású másodfokú delta-sigma A/D¹³ átalakítókat tartalmaz. Ezek az átalakítók a visszacsatolt A/D átalakítók egy speciális csoportját alkotják.

Az átalakítóban a bemeneti jel először egy különbségképző erősítő egyik bemenetére jut, melynek kimenetére egy meghatározott integrálási idővel rendelkező integrátor kapcsolódik – ezt nevezik delta-sigma modulátornak, amiről az átalakító típus a nevét kapta. Az integrátor kimenetét egy nagy frekvenciával – az f_s mintavételi frekvenciával vezérelt (engedélyezett) komparátor követi, amely az integrátor kimeneti jelét hasonlítja össze a referencia feszültséggel. Ha az integrátor kimeneti feszültsége eléri a komparátor referencia feszültségét a komparátor kimenete állapotot vált, az az 1 bites A/D átalakítóként működik. Így a kimeneten egy bites eredmény jelenik meg, amely tekinthető impulzussűrűség modulált jelnek is, melynek impulzus-sűrűsége arányos a bemeneti jel nagyságával. Ez a kimeneti jel jut visszacsatolásban elhelyezkedő 1 bites digitális-analóg átalakító és a kimeneti decimáló, vagy más néven átlagoló szűrő bemenetére is. Az 1 bites digitális-analóg átalakító kimenete a különbségképző bemenetére kapcsolódik így a kimeneti jel függvényében változtatja meg a bemeneti jel polaritását, ezzel befolyásolva az integrátor kimeneti jelének változását. A decimáló szűrő kimenetén lévő jel a bemeneten lévő bit-folyam átlagaként fogható fel, a decimálási arányt pedig a bemeneti f_s mintavételi frekvencia és kimeneti adatelérési f_D frekvencia átlaga adja meg.

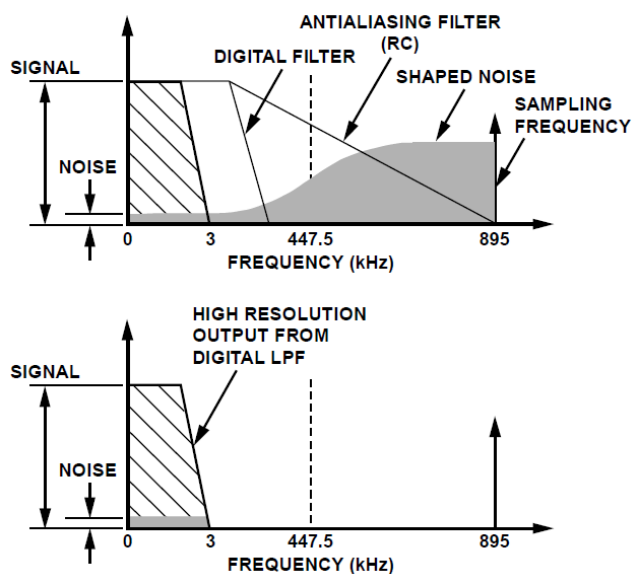


15. ábra: A delta-sigma analóg digitális átalakító felépítése (forrás:)

Az ezen az elven működő A/D átalakítók kvantálási zaj-frekvencia képe speciális, a kvantálási zaj nagysága a magasabb frekvenciák felé növekszik, az alacsony frekvenciák

¹³ delta-sigma A/D – a továbbiakban: $\Delta\Sigma$ -A/D

felé csökken az integrátor és a magas mintavételi frekvencia miatt. Ezzel a megoldással a delta-sigma modulátorral felépített A/D átalakítók alacsony frekvencián nagyon jól alkalmazhatók. A modulátor fokszáma növelhető további további különbségképző és integrátor beépítésével, és így a jel zaj viszony az alacsonyfrekvenciákon továbbnövelhető.



16. ábra: A delta-sigma analóg –digitális átlakító jel-zaj viszonya a frekvencia függvényében(forrás:)

Az AFE beépített másodfokú $\Delta\Sigma$ - A/D átalakítók kimeneti jelét egy belső rögzített funkciójú, de paraméterezhető digitális jelfeldolgozó processzorral dolgozza fel. A processzor a már mintavételezett és kvantált bemeneti jel folyamából számítja ki a fogyasztási és teljesítmény értékeket a diszkrét idejű jelekre vonatkozó összefüggések alapján:

Így például a szabályosan mintavételezett és kvantált periodikus jel effektív értéke diszkrét idejű esetben:

$$k_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^N k^2[n]}$$

Mivel az AFE-ben található AD modulok közös trigger, és órajelet kapnak, így biztosított a feszültséggel és az árammal arányos bemeneti feszültségek egyidejű mintavételezése, az effektív értékekből pedig meghatározható az adott számú periódusra vonatkozó teljesítmény:

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

Amely segítségével meghatározható az adott időtartamra vonatkozó fogyasztás:

$$E = \int P dt = \lim_{T \rightarrow 0} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} P(nT) \cdot T \right\}$$

Az AFE a fentebb ismertetett összefüggések diszkrét idejű megfelelőinek segítségével és az áram és feszültségértékek egymáshoz képesti fázisának mérésével képes meghatározni a látszólagos és meddő teljesítményeket és fogyasztás értéket is. Ezen kívül az AFE három féle módon képes a fogyasztási értékek akkumulálására, képzésre:

- Előjeles akkumulálás – azaz fogyasztott és szolgáltatott energia előjeles összegének képzése
- Pozitív akkumulálás – csak a fogyasztott energia akkumulálása
- Abszolút akkumulálás – A fogyasztott és szolgáltatott energiák összegének akkumulálása

Ezen kívül az AFE az előre leprogramozott események és bemeneti jelszintek esetén dedikált megszakítást ad.

6.3 Kommunikációs, és adattároló perifériák

A kommunikációt két felületen keresztül valósíthatja meg a készülék. Az egyik szabványos Ethernet fizikai közegen keresztül TCP/IP protokollon keresztül a Microchip ENC28J60 vagy korszerűbb PYH és Ethernet vezérlője segítségével, illetve egy 2,4GHz-es Digi International gyártmányú XbeePRO modul segítségével.

Az Ethernet modul a mikrokontroller második SPI buszára csatlakozik, amin keresztül felkonfigurálható. Működtetéséhez megfelelő kivezetéseit csatlakoztatni kell az SPI buszra és biztosítani kell számára egy a kiválasztását indikáló vezérlővonalat is. A modul és a Microchip TCP/IP Stack szoftverkönyvtára segítségével és saját taszkok megvalósítható TCP/IP vagy UDP alapú kapcsolat a fogyasztásmérő és egy PC között, aminek segítségével a fogyasztásmérő adatai kiolvashatók és megjeleníthetők a PC-n.



17. ábra: Az alkalmazott Ethernet SPIátjáró modul

A másik kommunikációs lehetőséget az XBee-modul biztosítja. ez a modul a mikrokontrollerrel egyszerű UART felületen kommunikál, és transzparent kommunikációs lehetőséget biztosít a fogyasztásmérő és a kiolvasó eszköz között. A modul az adatrádióon kívül egy A típus és a kommunikációs protokoll sajátossága, hogy a modul firmware cserével akár forgalomirányító vagy hálózat-moderátor szerepet is betölthet, így több modul segítségével létrehozható egy intelligens, a fogyasztási adatokat begyűjtő és továbbító adathálózat az egyes fogyasztásmérők között.



18. ábra: Az alkalmazott RF modul

A készülékben a kommunikációs perifériákon kívül két adattároló eszköz is helyet kapott. Az egyik egy SPI interfészen keresztül írható és olvasható szabványos SD kártya,

mely hasonlóan az Ethernet modulhoz a mikrokontroller második SPI moduljához kapcsolódik. Az adathordozó és a hozzá tartozó fájlrendszer működtetéséhez az SPI busz vezetékein kívül további 3 vezetékre van szükség, ezek segítségével detektálható az adathordozó jelenléte, az adathordozó írásvédettsége, valamint szükséges egy címző vezeték is, amivel a mikrokontroller aktív állapotba helyezheti az adathordozó vezérlőjét. Feladata a mérési eredmények időszakos tárolása valamint a készülék diagnosztikai adatainak rögzítése.

A másik adattároló periféria egy Microchip által gyártott 25LC256 típusú SPI interfésszel rendelkező EEPROM amely szintén a második SPI buszra kapcsolódik az Ethernet modulhoz, és az SD-kártyához hasonlóan. Feladata a kalibrációs és konfigurációs adatok valamint TCP/IP Stack-hez tartozó képfájlok tárolása.

6.4 Mikrokontroller, vezérlő áramkör

Az AFE által szolgáltatott adatok feldolgozását, kijelzését és regisztrálását egy mikrokontroller végzi. A mikrokontroller típusának kiválasztásakor szempont volt az architektúra ismerete, megfelelő perifériák megléte az elegendő memória méret és a gyártó által biztosított szoftverkörnyezet. A választás így a Microchip dsPIC33EP256MU806 típusú processzorára esett.

A processzor 2 különálló UART és SPI interfésszel rendelkezik, tartalmaz beépített RTC modult, legnagyobb működési sebessége pedig 70MIPS. A nyomtatott áramkör tervezés szempontjából előnyös tulajdonság a PPS lehetőség, amivel a különböző perifériák ki és bemenetei rugalmasan konfigurálhatók a különböző kivezetésekre.

A mikrokontroller programozásához Microchip gyártmányú PICkit3¹⁴ vagy ICD3¹⁵ eszközök alkalmazhatóak. Ezek a mikrokontroller öt kivezetéséhez kapcsolódnak:

- MCLR – Master reset
- PGED3 – Program adat
- PGEC3 – program órajel
- V_{DD} – Tápfeszültség

¹⁴ PICkit2/3 – egyszerű PIC mikrokontroller programozó és hibakereső eszközök

¹⁵ ICD2/3 – In Circuit Debugger – áramkörbeli hibakereső és programozóeszközök

- GND – Föld

A mikrokontrollerhez történő gyors csatlakozáshoz és a programozás megkönnyítése a prototípuson egy RJ12-6/6 csatlakozóra lettek kivezelve a programozáshoz szükséges lábak.

Az órajelet a mikrokontroller külső kvarc oszcillátorból nyeri melynek frekvencia bizonytalansága kisebb a belső RC oszcillátorának frekvencia-bizonytalanságánál és hőmérsékletfüggésénél. Erre a soros kommunikációk időzítés kritikussága miatt volt szükség. Az oszcillátor frekvenciája 8 MHz a belső utasításciklus ebből a PLL áramkörrel 280 MHz F_{OSC} frekvenciát állít elő. Egy egy utasításciklus alatt végrehajtható utasítást a mikrokontroller 280/4 MHz periódusideje alatt, azaz 14,2 ns alatt hajt végre.

A mikrokontroller az AFE és az SPI-Ethernet átjáró kezelésére két különálló, de azonos funkcionalitással rendelkező SPI modult használ fel. Ez egyszerű shift-regisztereken alapuló soros szinkron kommunikációt tesz lehetővé a buszra kapcsolódó eszközök és a mikrokontroller között. és megfelelő beállítás esetén full-duplex kommunikáció is megvalósítható a segítségével. A kommunikáció megvalósításához összesen 4 vezetékre van szükség:

- SS – slave select, az SPI szolga eszköz engedélyezésére,
- CLK – soros órajel, a kommunikáció szinkronizálásához,
- MISO – master in serial out, a mikrokontroller adat bemenete melyre slave eszközök adat kimenete csatlakozik
- MOSI – master out serial in, a mikrokontroller adat kimenete, melyre a slave eszközök adat bemenete csatlakozik.

Az AFE az SPI1 modul segítségével kommunikál a mikrokontrollerrel, az SPI-Ethernet átjáró, az EEPROM és az SD kártya az SPI2 modult használják a kommunikációra.

A felhasználó a készülék által mért adatokat egy HD 44780 típusú vezérlővel szerelt 4 x 20 karakteres alfanumerikus LCD kijelzőről olvashatja le. A kijelző vezérlése 4 bites üzemmódban történik, a négy adatvezeték mellett három vezérlő jel is szükséges melyek közül egy adatengedélyező funkciót lát el egy azt határozza meg, hogy adat, vagy parancs érkezik a buszon és egy pedig az adatáramlás irányát határozza meg. Mivel a HD 44780 típusú kijelzők nem támogatják az LVTTTL azaz a 3,3 V-os logikát, a mikrokontroller és

a kijelző közvetlenül nem huzalozhatók össze. A probléma nem hidalható át egyszerű feszültségosztó alkalmazásával abban az esetben, ha a kijelzőről olvasni is szeretnénk, ezért a probléma megoldásához a Texas Instruments TXB 0104 típusú kétirányú kommunikációt lehetővé tevő logikai szintillesztő áramkörét alkalmaztam az adatvonalak illesztésére. A vezérlővonalak csak egyirányú kommunikációt kívánnak meg, és mivel az LCD kijelző vezérlőáramköre az 5 V-os TTL logikát támogatja - amely már 2 V-os bemeneti feszültségértéket logikai magas szintként érzékel – ezért közvetlenül meghajtható a mikrokontroller kimeneteivel.

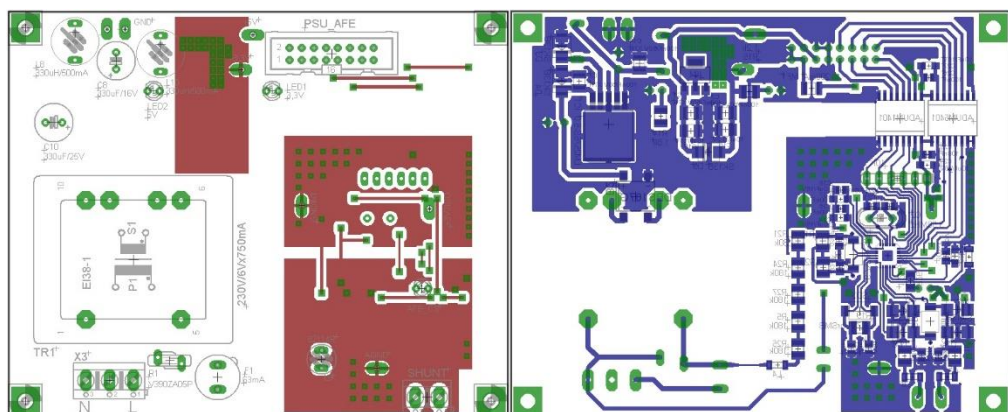
A kijelzőn megjelenő egyszerű menürendszerben a felhasználó egy nyomógomb és egy rotary encoder segítségével választhat a menüpontok közül. A nyomógomb és a rotary encoder kimenetei felhúzó ellenállásokkal logikai magas szintre vannak emelve. A nyomógomb és a rotary encoder lenyomásakor illetve elfordításakor a mikrokontroller bemenetén logikai alacsony feszültség jelenik meg a nyomógomb lenyomásának idejéig, illetve az encoder forgatása esetén annak két kimenetén egy egymáshoz képest 90°-al eltolt a forgatás sebességével arányos impulzuspár detektálható.

7 A PROTOTÍPUS GYÁRTÁSA

7.1 NYÁK tervezés, gyártás

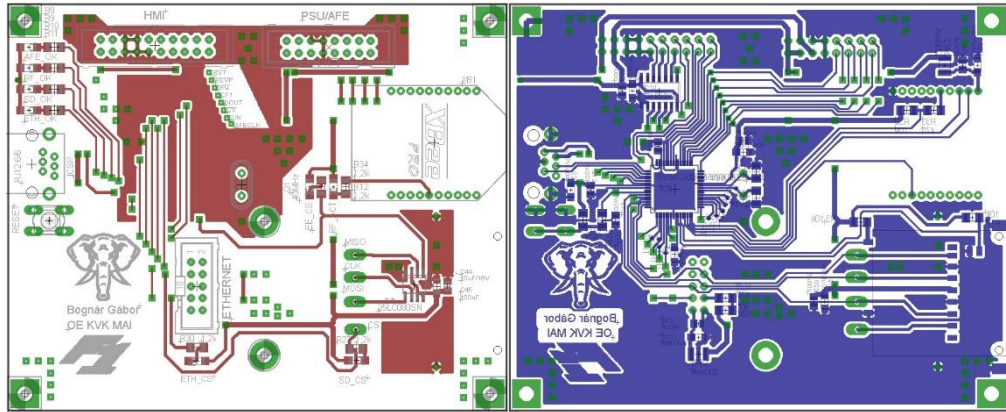
A NYÁK tervezése az EAGLE kapcsolás és nyomtatott áramkör tervező program 6.5-es oktatási licenccel rendelkező verziójával készült. A kapcsolási rajz elkészítése (az alkatrész kiválasztás, és paraméterezés) után az alkatrész elhelyezés, és a rajzolat kialakítás következett. Az alkatrészek elhelyezésekor először a csatlakozók kerültek a NYÁK szélére majd a nagyobb helyigényű alkatrészek elhelyezése következett. A rajzolat kialakítás során külön ügyeltem a kritikus áramköri részletek megfelelő, referencia ajánlás szerinti kialakítására. különösen az AFE izolációjánál. A zavarvédetség és a stabil működés érdekében a rajzolon „teliföld” fólia került kialakításra ez által a nagyfrekvenciás zavarvédetség nagymértékben javul, illetve csökken a belső földhurkokból származó zavarfeszültségek nagysága. A külső kiegészítő áramkörök csatlakozók segítségével köthetők az áramkörbe, valamint a hibakeresés, tesztelés, és élesztés megkönnyítésére a nevezetes áramköri pontokon tesztpontok érintkező tűskével ellátva kerültek kialakításra.

A készülék összesen három modulból épül fel. Az első modul tartalmazza a nagy feszültség alatt álló áramköri elemeket, a hálózati tápegységet az AFE-et és annak izolációs áramköreit.



19. ábra: Az AFE-et és tápegységet tartalmazó NYÁK szerelési és alkatrész oldala

A második modul tartalmazza a mikrokontrollert a kommunikációs és adattároló periferiákat.



20. ábra: A mikrokontrollert és az egyéb digitális periferiákat tartalmazó NYÁK szerelési és alkatrész oldala

A harmadik modul tartalmazza a kijelzőt és a felhasználó által a menürendszerben történő navigálásra használható nyomógombokat és a rotary encodert.

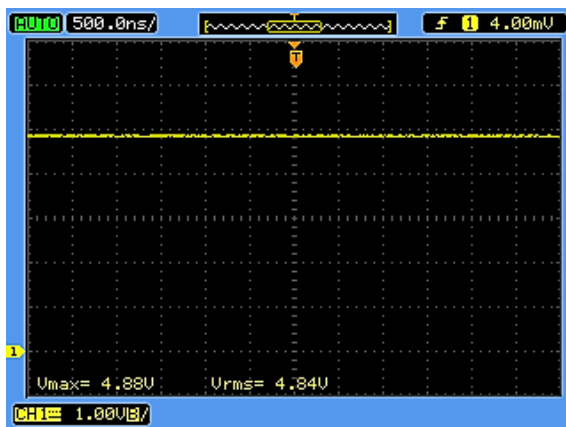
A modulok egymással törésgátlóval ellátott szalagkábelek segítségével csatlakoznak és egymás fölé helyezhető kivitelben készültek el. Így a készülék kompakt méretű műszerdobozba építhető.

8 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

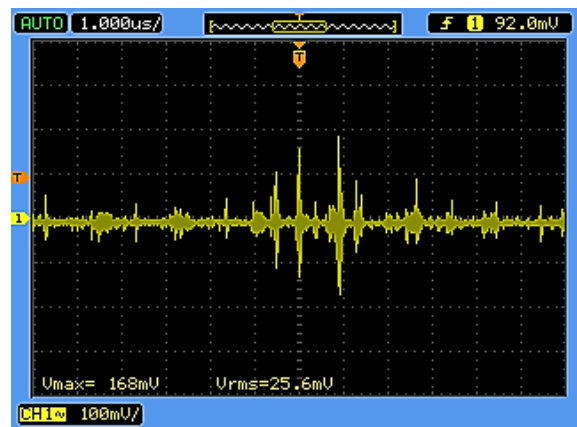
8.1 Az áramkörök funkcionális vizsgálata

Tápfeszültségek vizsgálata

A készülék élesztése a tápfeszültségek vizsgálatával kezdődött. A tápfeszültségek megfelelő értékének megléte és zavarmentessége elengedhetetlen a készülék stabil és pontos működéséhez. A mérések során ellenőriztem a tápfeszültségek értékét és zajtartalmát az 5 V-os a 3,3 V-os és az izolált tápfeszültség esetében is. A mérések eredményei a következő ábrákon láthatók.

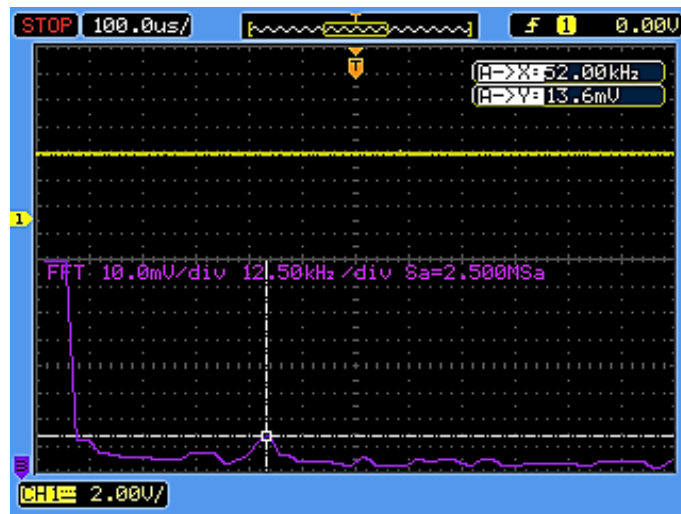


21. ábra: Az 5 V-os tápfeszültség értékének meghatározása



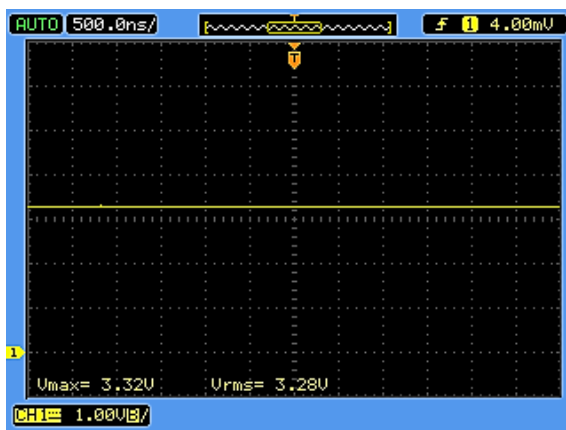
22. ábra: Zaj megjelenése az 5 V-os tápfeszültségen

A 21. ábra és a 22. ábraábrákon az 5 V-os tápfeszültség értékének és zajtartalmának megfigyelése látható. Az 5 V-os tápfeszültséget egy kapcsolóüzemű stabilizátor állítja elő, melynek kapcsolófrekvenciája kimeneti stabilizált feszültségben is megjelenik. A stabilizátor adatlapja szerint a kapcsolófrekvencia 52 kHz névleges értékű, amit a mérés is igazolt (23. ábra).

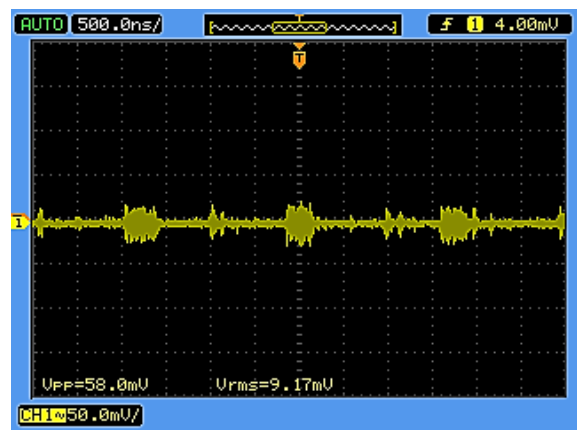


23. ábra: A kapcsolófrekvencia megjelenése az 5 V-os tápfeszültségben

A 3,3 V-os tápfeszültséget egy folyamatos működésű feszültségszabályozó állítja elő melynek jobbak az értéktartási tulajdonságai és kisebb zajt bocsájt ki a kapcsolóüzemű típusoknál. Ennek megfelelően a 3,3 V-os kimeneten mérhető zajfeszültség amplitúdója sokkal kisebb az 5 V-os ágba mérhető zajfeszültség amplitúdójánál.



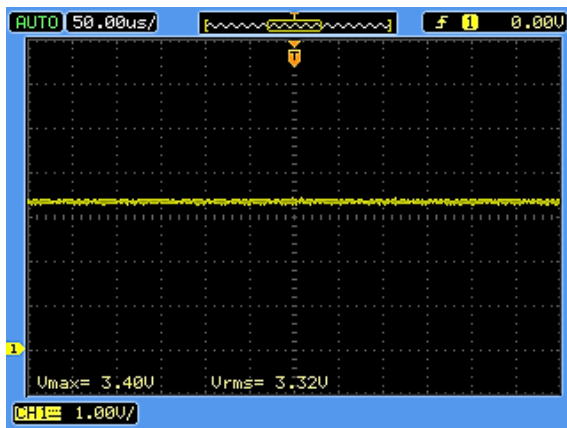
24. ábra: A 3,3 V-os tápfeszültség vizsgálata



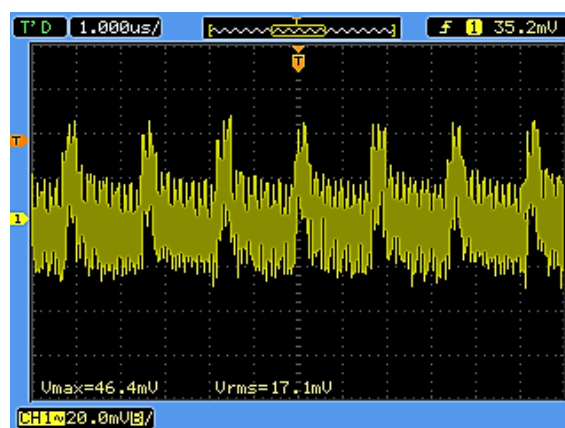
25. ábra: Zaj megjelenése a 3,3 V-os tápfeszültségen

Az izolált tápfeszültséget az ADuM 5401 típusú izolált tápegységet is tartalmazó interfész izolátor állítja elő. Hogy nagy hatásfokkal legyen képes az izoláció egyik oldaláról a másik oldalára energiát átjuttatni, nagy frekvencián üzemelő kapcsolóüzemű tápegységet tartalmaz melynek névleges kapcsolófrekvenciája 140 MHz. Az izolátor tápfeszültség kimenetén megjelenő feszültség értékének és zajtartalmának vizsgálatát a

26. ábra és 27. ábraák mutatják be. A 27. ábraán megfigyelhető a nagyfrekvenciás zaj megjelenése az izolált tápfeszültségen, értéke azonban csekély, a standard kapcsolóüzemű tápegység által okozott zaj értékénél kisebb.



26. ábra: Az izolált tápfeszültség vizsgálata

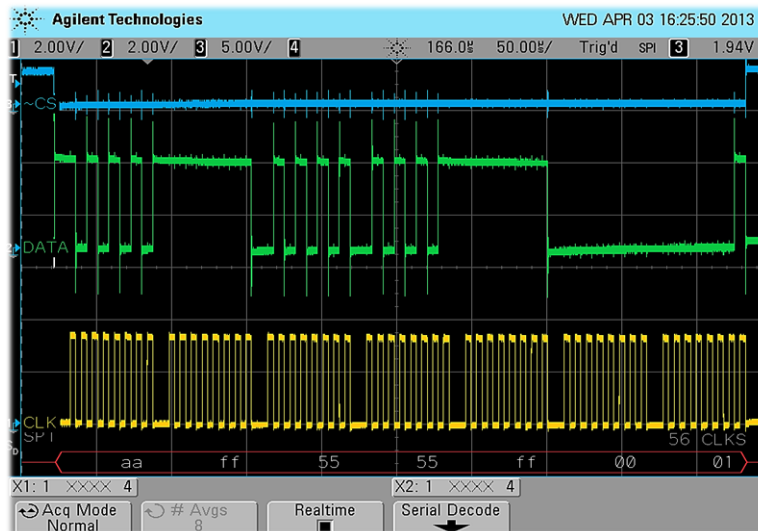


27. ábra: Zaj megjelenés az Izolált tápfeszültségben

Az SPI kommunikáció vizsgálata

A készülék működése közben az AFE-el SPI interfészen keresztül kommunikál az AFE-adatlapjában meghatározott 56 bites kommunikációs protokoll szerint. A kommunikáció vizsgálatára a megfelelő kommunikációs üzemmód és a küldött és fogadott adatok ellenőrzéshez volt szükség. A mérés elvégzéséhez négy csatornás digitális oszcilloszkópot használtam fel, speciálisan az SPI kommunikáció engedélyező jelének lefutására történő triggerelési beállítással.

A mérések és a kommunikáció analizálásának eredménye képen a mikrokontroller SPI moduljával, keretezett üzemmódban, nagy 2,5 MHz-es órajelfrekvencia mellett képes vagyok kommunikálni az AFE-el.



28. ábra: Egy érvényes írási művelet az AFE-en

8.2 Az áramkörök parametrikus vizsgálata

A feszültségosztó osztásviszonyának meghatározása

A készülék a feszültségosztón keresztül érzékeli a hálózati feszültség értékét. Az feszültségosztó feladata a 230 V effektív értékű hálózati feszültség leosztása az AFE által feldolgozható legfeljebb 500 mV értékű feszültséggé. A feszültségosztó osztásviszonyának meghatározása a készülék kalibrációjához és beszabályozásához szükséges. A feszültségosztó névleges osztásviszonya:

$$A_{uf} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{750 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 1,331 \cdot 10^{-3}$$

Mivel az osztót 1206-os méretekkel rendelkező 1% SMD ellenállásokból építettem fel a nyomtatott áramköri lemezen ezért az osztó 750 k Ω névleges értékű elemét négy darab 180 k Ω -os és egy 30k k Ω -os névleges értékű 1% tűrésű ellenállásból építettem fel, hogy a kis mechanikai méret és az osztó felső tagján eső átívelés esélyét csökkentsem.

Az így felépített feszültségosztó osztásviszonyát egy Agilent 34401A típusú digitális multiméterrel határoztam meg. A multiméter egy órás mérés-előkészítési időtartam letelte után négyvezetékes ellenállás-mérési elrendezés esetén, 6 $\frac{1}{2}$ digitális kijelzéssel, 1 M Ω -os méréshatárban 5 μ A-es mérőáram mellett a következő bizonytalansággal képes meghatározni az osztó 750 k Ω -os tagjának ellenállását:

$$Bizonytalanság_{@1M\Omega} = \pm(0,010 \% + 0,001 \%)$$

Így a bemeneti feszültségosztó felső tagjának ellenállása:

$$R_1 = 750,460 \text{ k}\Omega \pm 0,0101 \%$$

Az osztó alsó, 1 k Ω -os tagjának meghatározása a multiméter 10 k Ω -os méréshatárában 10 μ A-es mérőárammal a fentiekhez hasonló feltételek mellett a következő bizonytalansággal határozható meg:

$$Bizonytalanság_{@100k\Omega} = \pm(0,010 \% + 0,001 \%)$$

Így a bemeneti feszültségosztó felső tagjának ellenállása:

$$R_2 = 1,001 \text{ k}\Omega \pm 0,0101 \%$$

Ezek alapján a feszültségosztó valós osztásviszonya:

$$A_{Uf} = \frac{1,001 \text{ k}\Omega}{1,001 \text{ k}\Omega + 750,460 \text{ k}\Omega} = 1,332 \cdot 10^{-3}$$

Az AFE legnagyobb bemeneti feszültsége 500 mV_{PP} lehet, 1-szeres PGA beállítás mellett így olvasható ki a legnagyobb érvényes (9032007) decimális számérték. Ez alapján 230 V-os tisztán szinuzos bemeneti feszültség mellett az osztó kimeneti feszültsége:

$$U_p = 230 \text{ V}_{RMS} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{1,001 \text{ k}\Omega}{1,001 \text{ k}\Omega + 750,46 \text{ k}\Omega} = 433,281 \text{ mV}_{PP}$$

Ez a maximális bemeneti értékhez képest a következő mértékű kivezérlést jelent:

$$FS\%_{U_p} = \frac{U_p}{500 \text{ mV}} \cdot 100 \% = \frac{433,2818183 \text{ V}_{PP}}{500 \text{ mV}_{PP}} \cdot 100 \% = 86,656\%$$

Ez alapján meghatározható a legnagyobb bemeneti feszültség, ami még nem vezérli túl az AFE bemenetét. Ennek értéke a következő:

$$U_{MAX \text{ to } FS} = \frac{500 \text{ mV}_{PP}}{\sqrt{2} \cdot \frac{1,001 \text{ k}\Omega}{1,001 \text{ k}\Omega + 750,46 \text{ k}\Omega}} = 265,416 \text{ V}_{RMS}$$

A söntellenállás értékének meghatározása

A söntellenállás egy speciális kis hőmérsékletfüggésű ($\Delta R < 60 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$; $< 500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 1% névleges tűrésű típus, amely speciális SOT 227 típusú tokozásban kapott helyet a jó hő elvezető felületre történő könnyű rögzítés érdekében. Névleges ellenállásértéke $10^{-3} \Omega$, Legnagyobb terhelhetősége 100W, rövid ideig 500 A értékű áramot is elvisel, legnagyobb szigetelési feszültsége pedig 1000 V DC. A precíz mérés érdekében a tokozás Kelvin-elvezetéssel rendelkezik, így feszültség érzékelő pontok el vannak választva az áram hozzávezetésektől.



29. ábra: Az alkalmazott söntellenállás

Az ellenállás pontos értékének meghatározásához, egy Agilent 34401A típusú digitális multimétert használtam fel. A söntellenálláshoz 4 vezetékes ellenállásmérési üzemmódban, Kelvin-csipeszes mérővezetékkel csatlakoztattam a multimétert. Ezután leolvastam a mért eredményt a kijelzőről.

A multiméter mérési bizonytalansága a 100Ω -os méréshatárban, négyvezetékes üzemmódban:

$$\text{Bizonytalanság}_{@4W100\Omega} = \pm(0,10 \% + 0,004 \%)$$

Az így kapott mérési eredményekből a multiméter felbontása miatt nem tudtam a névleges értéktől eltérő ellenállásértéket meghatározni, így a söntellenállás értékét a továbbiakban $10^{-3} \Omega$ nagyságúnak tekintem.

A készülékben történő alkalmazása során maximális árama 16 A effektív értékben korlátozva van, így a rajta disszipálódó hőmennyiség meghatározható:

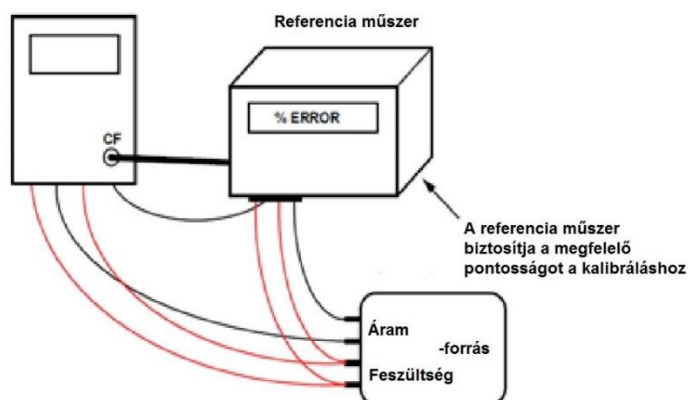
$$P_d = I^2 \cdot R = 16 \text{ A}^2 \cdot 10^{-3} \Omega = 0,256 \text{ W}$$

Ez a disszipációs érték az ellenállás névleges terhelhetőségének megközelítőleg 391-egyed része, így normál működés esetén az önmelegedésből származó hiba nagysága elhanyagolható.

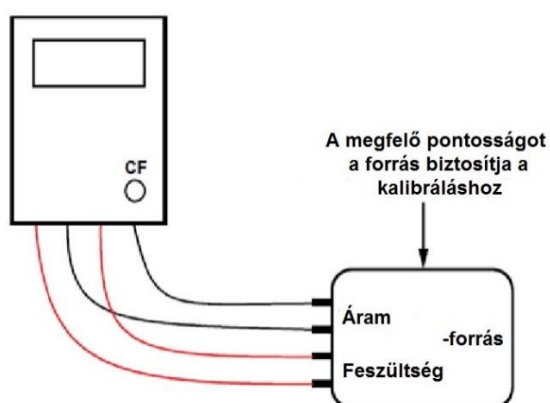
8.3 A készülék kalibrálása és beszbályozása

A készülék mérési eredményeinek kalibrálása két módon valósítható meg:

- Egy referencia műszer alkalmazásával – közvetett kalibrálás
- Egy pontos ismert értékeket előállító feszültség és áramforrás alkalmazásával – közvetlen kalibrálás



30. ábra: A közvetett kalibrálás elrendezése



31. ábra: A közvetlen kalibrálás elrendezése

Mivel nagy pontosságú vezérlehető feszültség és áramforrás nem állt rendelkezésemre, ezért a közvetett kalibrálási módszert választottam. A kalibrálás bizonytalansági arányát a kalibrálatlan műszerek miatt nem tudtam meghatározni, ezért a készüléken végzett kalibrálási eljárás csupán tájékoztató jellegű, a mérés menetét mutatja be és nem tekinthető pontosnak.

Érvényes közvetett kalibrálás esetén a kalibrálás bizonytalansági arányának ¹⁶ meghatározása a következő összefüggések szerint történik:

$$TUR_1 = \frac{h_T}{h_E}$$

Ahol:

- h_E – Az etalon bizonytalansága
- h_T – A transzfer etalon bizonytalansága

$$TUR_2 = \frac{h_K}{h_T}$$

Ahol:

- h_K – A kalibrálandó mérőeszköz bizonytalansága
- h_T – A transzfer etalon bizonytalansága

$$TUR_{EREDŐ} = TUR_1 \cdot TUR_2 = \frac{h_K}{h_E}$$

Így a transzfer etalon segítségével elvégezhető a kalibrálás, és a művelet visszavezethető az eredeti nem vagy nehezen hordozható és kényes etalonra.

A feszültség és árammérés funkció kalibrálása és beszabályozása:

Az üzemmódok kalibrálásához 3 A terhelhetőségű biztonsági leválasztó transzformátort és különböző fogyasztókat használtam fel. A pontos feszültség és áramértékeket

¹⁶ A kalibrálás bizonytalansági aránya – TUR, Test Uncertainty Ratio

az Agilent 34401A típusú multiméterek szolgáltatták. Az első kalibráció során a készülékre olyan programot töltöttem, amely a karakteres LCD kijelzőre másodpercenként kétszer frissítve kiírja az AFE által mért feszültség és áramérték effektív értékét. egy beállított feszültség érték hatására fogyasztón áram folyt, melynek stabilizálódására a mérések között 5 perc időtartamot hagytam. A multiméterek és a készülék adatait fénykép segítségével leolvasva felvettem egy 14 elemből álló mérési sorozatot.

A mérési eredmények kiértékelését MS Excel segítségével végeztem el. A táblázatkezelő segítségével kiszámítottam, hogy adott bemeneti feszültség és áram esetén, (ismerve a feszültségosztó és a sőtellenállás paramétereit, és számítás módját) mekkora decimális értéket kell megjelenítenie a készüléknek:

$$U_{Elvart} = U_{Agilent} \cdot 1,332 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{2}}{U_{P_MAX}} \cdot VRMS_{MAX} = U_{Agilent} \cdot 1,332 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{2}}{0,5 V} \cdot 9032007$$

$$I_{Elvart} = I_{Agilent} \cdot 22 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \frac{\sqrt{2}}{U_{IA_MAX}} \cdot IRMS_{MAX} = U_{Agilent} \cdot 1,332 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt{2}}{0,5 V} \cdot 9032007$$

Így tehát rendelkezésemre állt egy nagy pontosságú elvárt eredmény valamint a mérés eredménye, melyekből kiszámítható mérés abszolút és relatív hibája és meghatározható az erősítés hibája is.

A mérés abszolút hibája:

$$H = x_{mért} - x_{elvart}$$

A mérés relatív hibája százalékban megadva:

$$h_{m\%} = \frac{H}{x_m} \cdot 100\%$$

Az erősítés hibája százalékban megadva:

$$A_{error} = 1 - \frac{x_{elvart}}{x_{mért}} \cdot 100\%$$

A mérési eredményekből kiszámoltam a hibákat és segítségével módosítottam az AFE korrekciós regisztereinek értékét a következő összefüggések alapján:

A megfelelő feszültség és áramértékek eléréséhez szükséges erősítés korrekciós együttható:

$$xGAIN_{HEX} = 0x400000_{HEX} \cdot \frac{x_{elvárt}}{x_{mért}}$$

Valamint az offsetet kompenzáló együttható:

$$xRMSOS = \frac{xRMS_{elvárt}^2 - xRMS_{mért}^2}{2^{12}}$$

A korrekciós együtthatók beprogramozása után a kalibrálást újra elvégeztem, a hibákat és a korrekciós együtthatók értékét ismét kiszámoltam és módosított értékeket ismételt beprogramoztam.

A kalibrálás-beszabályozás folyamatát addig folytattam, amíg a relatív hiba megfelelően kis értékűre nem csökkent.

A teljesítmény és fogyasztásmérő üzemmód kalibrálása és szabályozása

Az üzemmódok kalibrálásának első lépéseként meg kell határozni a mért teljesítmények legkisebb helyértékű bitre vonatkozó értékét mind a látszólagos, mind a hatásos mind a meddő teljesítmények esetén a következő összefüggések alapján:

$$\frac{Wh}{LSB} = \frac{U[V] \cdot I[A] \cdot \cos \varphi \cdot \text{Akkumulációs időtartam}[s]}{AENERGY \cdot 3600[s/h]}$$

$$\frac{VAh}{LSB} = \frac{U[V] \cdot I[A] \cdot \text{Akkumulációs időtartam}[s]}{APENERGY \cdot 3600[s/h]}$$

$$\frac{Varh}{LSB} = \frac{U[V] \cdot I[A] \cdot \sin \varphi \cdot \text{Akkumulációs időtartam}[s]}{RENERGY \cdot 3600[s/h]}$$

,ahol az xENERGY változók az AFE xENERGY regisztereinek decimális értékei.

Ez után, - ismerve a terhelés paramétereit – kiszámíthatók az elvárt teljesítmény értékek az adott terhelés mellett a következő összefüggések segítségével:

$$AENERGY_{elvárt} = \frac{U[V] \cdot I[A] \cdot \cos \varphi \cdot \text{Akkumulációs időtartam}[s]}{\frac{Wh}{LSB} \cdot 3600[s/h]}$$

$$APENERGY_{elvárt} = \frac{U[V] \cdot I[A] \cdot \text{Akkumulációs időtartam}[s]}{\frac{VAh}{LSB} \cdot 3600 \left[\frac{s}{h}\right]}$$

$$RENERGY_{elvárt} = \frac{U[V] \cdot I[A] \cdot \sin \varphi \cdot \text{Akkumulációs időtartam}[s]}{\frac{Var}{LSB} \cdot 3600[s/h]}$$

,ahol az xENERGY változók az AFE xENERGY regisztereinek decimális értékei.

Így az ismert és mért adatokból meghatározhatók a mérés hibái a fentebb ismerttetett összefüggések alapján. A hibák ismeretében a teljesítmény és fogyasztásmérő üzemmód erősítés és offset hibái az alábbi összefüggések alapján korrigálhatók:

$$xGAIN_{HEX} = 0x400000_{HEX} \cdot \frac{x_{elvárt}}{x_{mért}}$$

$$xOS = -1 \cdot error[\%] \cdot \frac{xENERGY_{elvárt}}{\text{Akkumulációs időtartam}[s]} \cdot \frac{0x14000000_{HEX}}{128 \cdot 6,99kHz}$$

,ahol

$$error[\%] = \frac{xENERGY_{mért} - xENERGY_{elvárt}}{xENERGY_{elvárt}}$$

és az xENERGY változók az AFE xENERGY regisztereinek decimális értékei.

A korrekciós együtthatók beprogramozása után hasonlóan a feszültség és árammérés üzemmód kalibrációjához hasonlóan a hibákat és a korrekciós együtthatók értékét ismét kiszámoltam és módosított értékeket ismételten beprogramoztam.

A kalibrálás-beszabályozás folyamatát addig folytattam, amíg a relatív hiba megfelelően kis értékűre nem csökkent.

9 SZOFTVERFEJLESZTÉS

A szoftver a Microchip MPLAB X v1.85 típusú fejlesztőkörnyezete és XC16 típusú C-fordítójának segítségével készítettem. A program megírásához felhasználtam a Microchip szabadon hozzáférhető, a fordító részét képező perifériakezelő könyvtárait, valamint az MDD-File system és a TCP-IP stack programkönyvtárakat. A szoftver a az AFE és a kommunikációs perifériák fizikai inicializálása után inicializálja a fájlrendszert és a TCP-IP stack felhasznált taszkjait. Az inicializálás során kiolvassa az AFE kalibrációs adatait, teszteli a kommunikáció helyességét mindkét irányba, majd pedig elvégzi a beszabályozást a megfelelő regiszterek írásával. A program az inicializálási folyamat és az önteszt végén megszakítás alapú működési ciklusba lép, ami kiszolgálja az időzítők és az AFE által generált megszakításokat. Különböző időzítő modulok által generált megszakítások hatására kijelző és a mérési adatokat tároló struktúra kerül frissítésre az adott üzemmódnak megfelelően, valamint a felhasználó által üzemeltett kezelőszervek állapotainak leolvasása történik meg.

Hogy a program fejlesztése során ne kelljen nagy hosszúságú fájlokkal dolgoznom külön a külön hardverelemekhez és funkciókhoz külön forrás és header fájlokat hoztam létre, amelyek az adott funkciót megvalósító, vagy az adott hardverelemet kezelő függvényeket deklarálják és definiálják. Ennek köszönhetően a főprogram, rövid és áttekinthetővé válik, abban csak a megfelelő függvények megírására van szükség.

A projekthez csatolt header és forrásfájlok listája mellékletként érhető el.

Az AFE-t kezelő saját függvények deklarációi:

```
char ResetAFE(void);           // Az afe alaphelyzetbe állítása
char InitAFE(void);           // Az AFE inicializálása
char CalibrateAFE(void);       // Az AFE kal. adatainak olvasása

char CorrigrateAFE(void);      // Az AFE beszabályozása

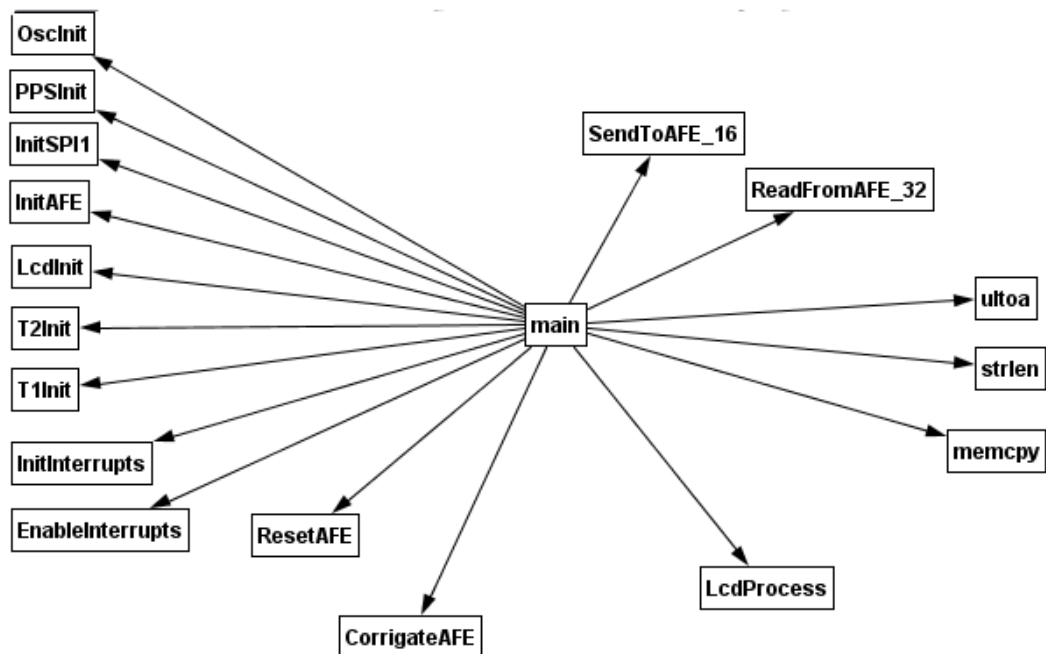
char ReadIRQreg(void);         // Az AFE IRQ. reg.-nek olvasása
char ClearIRQreg(void);        // Az AFE IRG reg.-nek törlése
// 8 bites író és olvasó műveletek
```

```

char SendToAFE_8( unsigned int address, unsigned int data );
char ReadFromAFE_8( unsigned int address );
// 16 bites író é olvasó műveletek
char SendToAFE_16( unsigned int address, unsigned int data );
int ReadFromAFE_16( unsigned int address );
// 32 bites író és olvasó műveletek
char SendToAFE_32( unsigned int address, unsigned long data );
long ReadFromAFE_32( unsigned int address );

```

A szoftver egyik test verziójának hívási gráfja a 32. ábrán látható.



32. ábra A kommunikációt tesztelő program hívási gráfja

10 FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A készülék további fejlesztésével kis terhelési értékeknél is alacsony bizonytalanság érhető el, megvalósítható a kapcsolt fogyasztói hálózat modernizálása, jobb illesztettsége a hálózat aktuális terhelési görbéjéhez, valamint megvalósítható az általános hálózati paraméterek vizsgálata mellett a hálózatba zavarként bejutott felharmonikusok illetve zavarjelek vizsgálata is 1,5 kHz frekvenciáig.

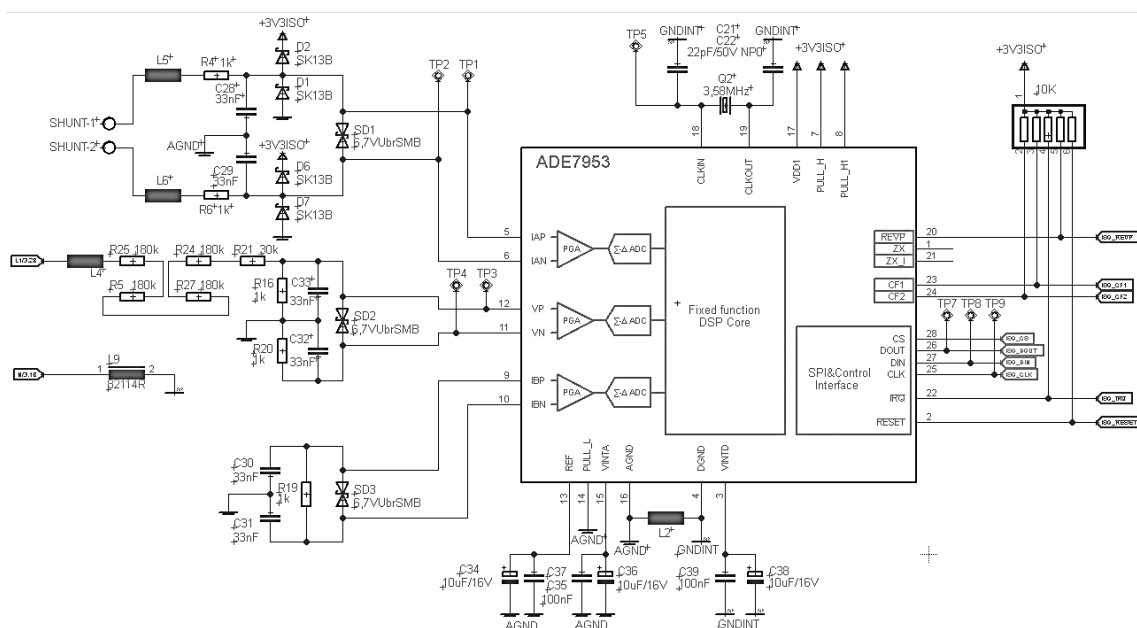
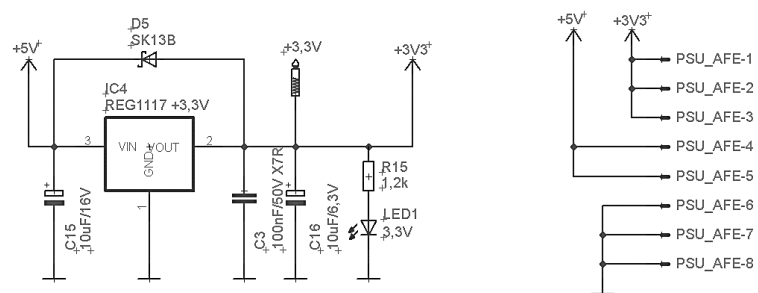
A készülékhez több féle árammérő szenzor is csatlakoztatható, és elérhető három fázisú kivitelben is, így a hardver áttervezésével a meglévő tapasztalatok alapján egy ipari fogyasztók paramétereinek nagy pontosságú mérésére is alkalmas műszer fejleszthető ki.

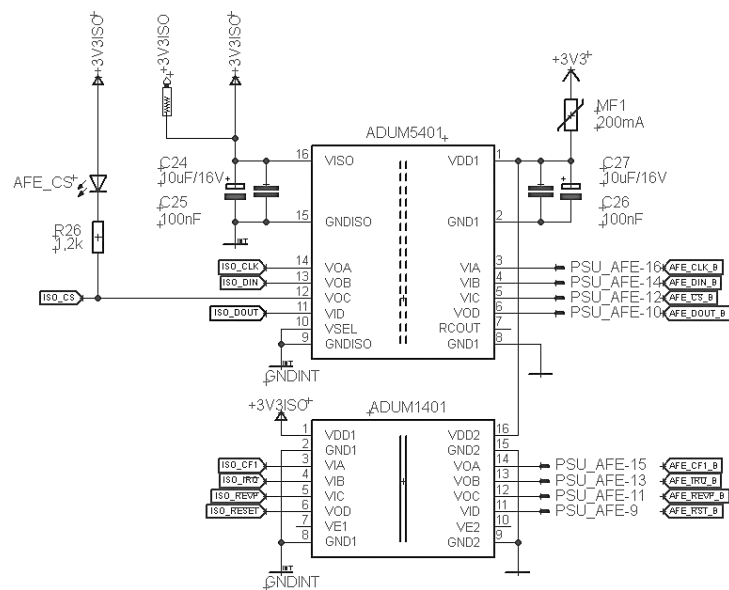
A kommunikációs programrészek továbbfejlesztésével és minimális további hardverszükséglet mellett megvalósítható a vezeték nélküli hálózaton keresztüli titkosított paraméter kiolvasás egy dedikált adatgyűjtő eszközre. Több készülék esetén megvalósítható a készülékek közötti vezeték nélküli kapcsolat, amin keresztül az egyes készülékek a saját adataik és egyéb vezérlőjelek továbbítását is megvalósíthatják. Az TCP/IP vagy UDP protokollon keresztül történő kommunikáció fejlesztésével lehetőség nyílik a műszer adatainak számítógépes felületen történő feldolgozására is. A további kommunikációs megoldások között szerepelhet a PLC¹⁷ kommunikáció megvalósítása, amikor is a fogyasztásmérő adatait időszakosan egy speciális illesztő áramkör segítségével a táphálózaton keresztül olvassák ki.

¹⁷ PLC – Power Line Communication –energetikai elosztóhálózaton történő kommunikációs megoldás

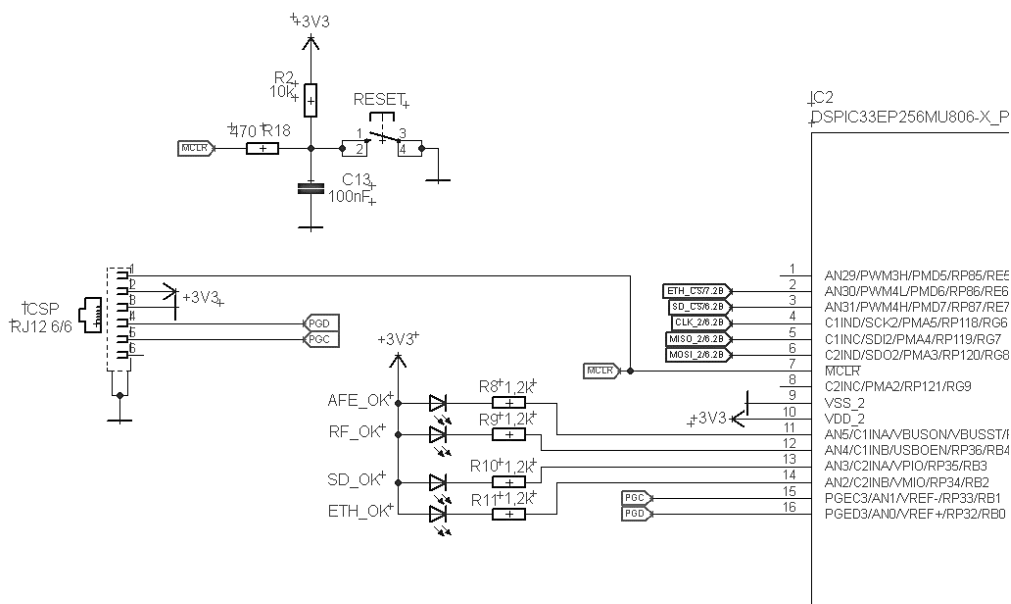
11 ÖSSZEGZÉS

A fogyasztásmérő fejlesztése során részletesen megismerkedtem az indukciós és elektronikus fogyasztásmérők felépítésével és működésével. Előzetes tanulmányaim és a téma irodalomkutatása után sikeresen megterveztem és megépítettem egy 230 V-os hálózaton üzemelő fogyasztás és teljesítménymérő műszert, amely képes a fogyasztó paramétereinek nagy pontosságú mérésére, kijelzésére és regisztrálására. A fejlesztés és a prototípus gyártása során bővültek az áramkör tervezési, élesztési, és gyártási ismereteim. Ezen kívül gyakorlatra tettem szert Microchip MPLAB X integrált fejlesztői környezetének használatában, a dsPIC33EP sorozatú PIC mikrovezérlők C nyelvű programfejlesztésében, valamint a mikrokontrollerekkel magvalósított vezetékes és vezeték nélküli kommunikációk programozásában.

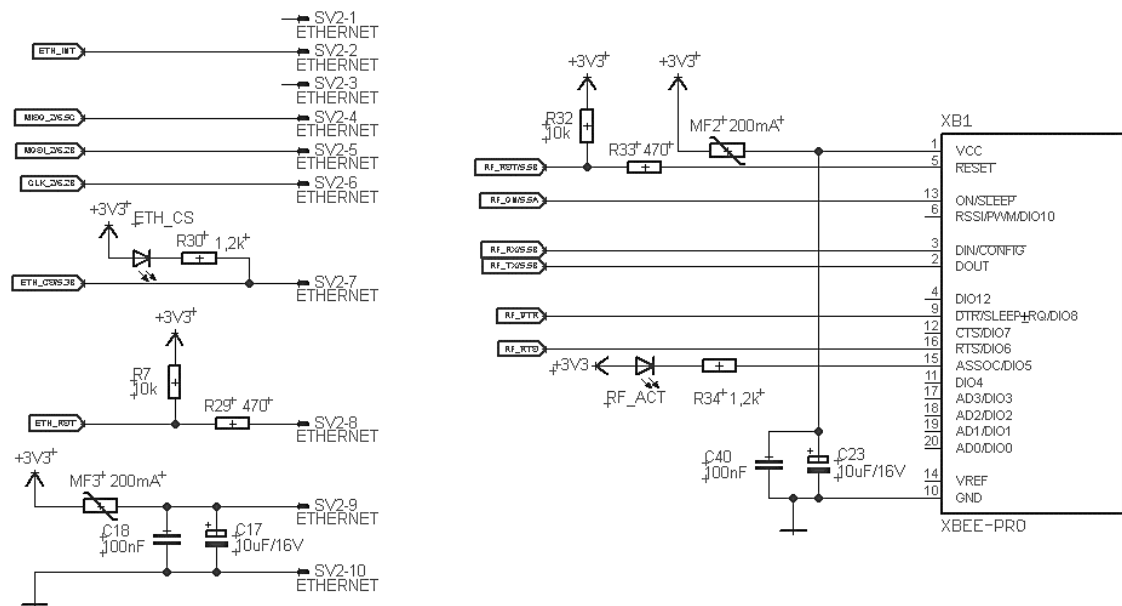




36. ábra: Az AFE-d izolációja



37. ábra: A mikrokontroller programozó kivezetései és a státusz LED-ek bekötése



40. ábra Az ZigBee és az Ethernet modul illesztése