



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék

# Háromfázisú mérőrendszer villamos hálózati jellemzők vizsgálatához

DIPLOMATERV

*Készítette*  
Sárközy Balázs

*Vállalati konzulens*  
Buday Csaba

*Tanszéki konzulens*  
Kökényesi Tamás

2018. december 1.

# Tartalomjegyzék

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Kivonat</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Bevezető</b>   | <b>6</b>  |
| <b>1. Energetikai áttekintés</b>                              | <b>7</b>  |
| 1.1. Feszültséghőminőség . . . . .                            | 7         |
| 1.2. CEER Benchmarking . . . . .                              | 8         |
| <b>2. C-RTU család</b>  | <b>10</b> |
| 2.1. Alapkészülék . . . . .                                   | 11        |
| 2.2. Kiegészítő modulok . . . . .                             | 11        |
| 2.2.1. Egységes funkciók . . . . .                            | 11        |
| 2.3. C-CAN protokoll . . . . .                                | 13        |
| 2.4. Mechanikai kialakítás . . . . .                          | 13        |
| <b>3. Rendszer jellemzők</b>                                  | <b>14</b> |
| 3.1. Specifikáció . . . . .                                   | 14        |
| 3.2. Feszültségmérés . . . . .                                | 15        |
| 3.2.1. Feszültségváltó transzformátor . . . . .               | 15        |
| 3.2.2. Ellenállásosztó és izolációs erősítő . . . . .         | 15        |
| 3.2.3. Ellenállásosztó és leválasztott ADC . . . . .          | 16        |
| 3.2.4. Feszültségmérési megoldások összehasonlítása . . . . . | 16        |
| 3.3. Árammérés . . . . .                                      | 16        |
| 3.3.1. Áramváltó transzformátor . . . . .                     | 17        |
| 3.3.2. Rogowski-tekercs . . . . .                             | 18        |
| 3.3.3. Sönt ellenállás és izolációs erősítő . . . . .         | 18        |
| 3.3.4. Hall-szenzoros árammérő . . . . .                      | 18        |
| 3.3.5. Árammérési megoldások összehasonlítása . . . . .       | 19        |
| 3.4. Adatfeldolgozás . . . . .                                | 20        |
| 3.4.1. Mikrokontroller . . . . .                              | 20        |
| 3.4.2. Digitális Jelfeldolgozó Processzor . . . . .           | 21        |
| 3.4.3. Programozható Logika . . . . .                         | 21        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4.4. Mérő IC, beégetett DSP kóddal . . . . .           | 21        |
| 3.5. Választott megoldás . . . . .                       | 21        |
| 3.5.1. Elméleti specifikáció, funkcionalitás . . . . .   | 23        |
| <b>4. Hardver konstrukció</b>                            | <b>26</b> |
| 4.1. Követelmények . . . . .                             | 26        |
| 4.2. Kapcsolási rajz . . . . .                           | 27        |
| 4.2.1. Kapcsolóüzemű tápegység . . . . .                 | 28        |
| 4.2.2. MCU és környezete . . . . .                       | 30        |
| 4.2.3. Bemeneti áramkör - Áram bemenet . . . . .         | 31        |
| 4.2.4. Bemeneti áramkör - Feszültség bemenet . . . . .   | 33        |
| 4.3. NYÁK terv . . . . .                                 | 34        |
| 4.4. Szabványosság . . . . .                             | 35        |
| 4.4.1. Szigeteléskoordináció . . . . .                   | 36        |
| 4.4.2. EMC . . . . .                                     | 38        |
| 4.4.3. EMC tesztek . . . . .                             | 42        |
| 4.4.4. Javítási tervezek . . . . .                       | 45        |
| 4.5. Mechanika . . . . .                                 | 47        |
| <b>5. Szoftveres komponensek</b>                         | <b>49</b> |
| 5.1. Mikrokontroller . . . . .                           | 49        |
| 5.2. Emulált EEPROM . . . . .                            | 49        |
| 5.3. Firmware . . . . .                                  | 51        |
| 5.3.1. Program felépítése . . . . .                      | 52        |
| 5.3.2. Mérő IC-t kezelő függvények, struktúrák . . . . . | 56        |
| 5.3.3. Debug UART . . . . .                              | 58        |
| 5.4. Linux oldali szoftver <- ide csak a crweb . . . . . | 58        |
| 5.5. Gyártás támogatás . . . . .                         | 58        |
| 5.5.1. Végmérés és kalibráció . . . . .                  | 59        |
| <b>6. Példaalkalmazás</b>                                | <b>61</b> |
| <b>Összefoglalás</b>                                     | <b>62</b> |
| <b>Köszönnetnyilvánítás</b>                              | <b>63</b> |
| <b>Ábrák jegyzéke</b>                                    | <b>65</b> |
| <b>Táblázatok jegyzéke</b>                               | <b>66</b> |
| <b>Irodalomjegyzék</b>                                   | <b>68</b> |
| <b>Függelék</b>  | <b>69</b> |
| F.1. Függelék 1 . . . . .                                | 69        |

## HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Budapest, 2018. december 11.

---

*Sárközy Balázs*  
hallgató

# Kivonat

TODO

# Abstract

TODO

# Bevezető

TODO[1]

TODOBB[2]

TODOEST[3]

TODOESTTEST[4]

Todododo[5]

Todododo[6]

Todododo[7]

Todododo[8]

Todododo[9]

Todododo[10]

TODOTODO[11]

TODOTODO[12]

TODOTODO[13]

TODOTODO[14]

TODOTODO[15]

TODOTODO[16]

TODOTODO[17]

TODOTODO[18]

TODOTODO[19]

TODOTODO[20]

TODOTODTO[21]

TODOTODTO[22]

## 1. fejezet

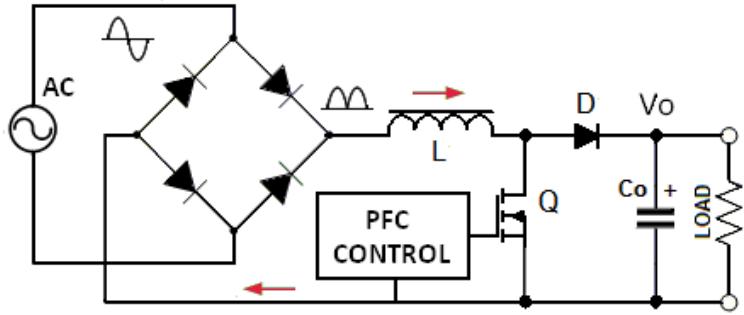
# Energetikai áttekintés

### 1.1. Feszültségminőség

Teljesítményminőségen, vagy helyesebben feszültségminőségen a hálózati feszültség paramétereit értjük, illetve azok megfelelését a névleges értékekhez, mely Magyarországon 230Veff, 50Hz, szinuszos fázis feszültségnek felel meg, fázisonként 120 fokkal eltolva háromfázisú rendszer esetében. A magyar hálózati feszültségek szabályozását az MSZ 1:2002-es szabvány írja le, ebben találhatóak meg a legkisebb, legnagyobb, valamint a névleges feszültség értékek, melyeket az áramszolgáltató köteles biztosítani a csatlakozási pontokon. A hálózati paraméterek természetesen ezektől az értékektől bizonyos mértékben eltérhetnek, az nem okoz a fogyasztóknál problémát, azonban túlságosan nagy eltérés esetén a hálózati feszültségről üzemelő berendezések károsodása következhet be, továbbá jelentős veszteségek léphetnek fel a villamosenergia-hálózatban, valamint a feszültségkimaradások, feszültségletörések, jelentős kiesésekkel, leállásokat, így többlet költségeket róhatnak a fogyasztókra.

A hálózatra csatlakoztatott, fázisonként legfeljebb 16A fogyasztású eszközök áramfelvételének harmonikus tartalmát az IEC 61000-3-2 korlátozza, azonban ennek szabvány a bevezetése előtt forgalomba került berendezésekre ez a szabvány nem vonatkozik, azok tovább üzemeltethetők elettartamuk végéig, annak ellenére, hogy leggyakrabban a hálózati áramfelvételük felharmonikus tartalma magas, emellett teljesítmény tényezőjük alacsony. Pontosan ez utóbbi két tulajdonság miatt került bevezetésre a harmonikus kibocsájtást korlátozó szabvány. A szabvány betartásának érdekében manapság leggyakrabban aktív PFC-t használnak, ennek egyszerűsített kapcsolása a 1.1-es ábrán látható.

A különböző fogyasztói elektronikai eszközök egyre inkább törpefeszültségű (<50V) DC tápot használnak, így a 230V-os feszültséget költséghatékony módon kell átalakítani az eszközök megfelelőre. A hálózatra csatlakoztatott tápegységek, például az igen nagy darabszámban gyártott kompakt 5V-os telefontöltők leggyakrabban egyenirányítás után egy elektrolit kondenzátorral állítanak elő egyenfeszültséget, majd egy flyback konverterrel



**1.1. ábra.** Aktív PFC felépítése

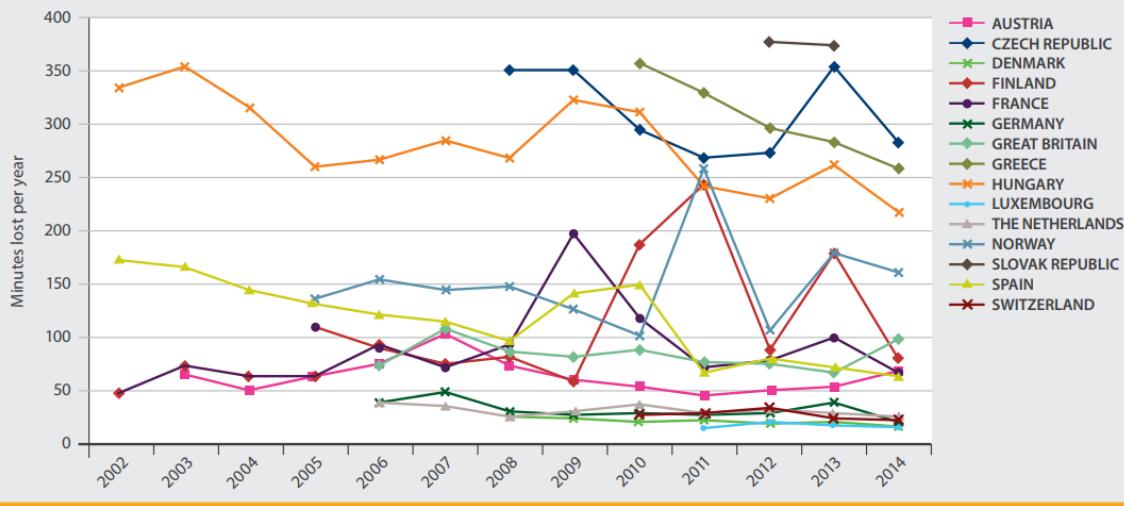
5V-ot biztosítanak a kimeneten. A magas THD tartalom egyik lehetséges hatása a primer oldali szűrőkondenzátor korai tönkremenetele, mivel azon a tervezett alapharmonikus áramösszetevő mellett további komponensek is megjelennek, azok pedig a soros ellenálláson disszipációt okoznak, mellyel magasabb hőmérséklet, rövidebb élettartam jár együtt. Egy további komoly probléma a hálózati harmonikus tartalom miatt bekövetkező többszörös, vagy időben nem állandó periódusú nullátmenet. Ez a hálózathoz szinkronizált berendezések, például inverterek, szinkron egyenirányítók helytelen, vagy rossz hatásfokú működését eredményezheti.

## 1.2. CEER Benchmarking

Az Európai Energia Szabályozók Tanácsa (CEER) rendszeresen hasonlítja össze és publikálja különböző országok feszültségminőség adatait, ezzel is ösztönözve az egységes, minőségi szolgáltatás biztosítását. A legutóbbi ilyen összehasonlítás, a 6th CEER Benchmarking Report on all the Quality of Electricity and Gas Supply 2016 volt, mely immár a 6. ilyen kiadvány. Az ebben feltüntetett adatok jól szemléltetik a különböző fejlesztési lehetőségeket.

A fenti ábrából jól látszik, hogy Magyarországon (Narancssárga trendvonal) összességében javuló tendencia mutatkozik a hosszú kimaradások tekintetében, azok száma 2002-höz viszonyítva 30-40%-kal csökkent. Fontos megjegyezni, hogy országok közötti összehasonlítás szempontjából csak hozzávetőleges információtartalommal bír a grafikon, mivel a hosszú kimaradások definíciója, vizsgálata országonként eltérhet. Különbség lehet abban például, hogy a kisfeszültségű (rövidítve KIF vagy angolul LV), középfeszültségű (KÖF vagy MV) vagy nagyfeszültségű (NAF vagy HV) hálózaton lévő kimaradásokat vizsgálják-e, ugyanakkor már a feszültségszintek felosztásában is lehet eltérés országok között. A jelentés több ajánlást is tesz a jövőbeni szolgáltatásmínőség javításához, ezekben elsősorban arra ösztönzi az áramszolgáltatókat, hogy növeljék a megfigyelési pontok számát, a minőséginformációk legyenek egységesek a vizsgált országokon belül. Az említett összehasonlítás nem egyedülálló, több szervezet is foglalkozik a villamos szolgáltatás minőségének javításával. Az elektronika fejlődésével, a félvezetők árának csökkenésével a 21. században a villamosenergia-hálózat fejlődése egyértelműen a "Smart Grid", vagyis okoshálózat irányá-

**FIGURE 2.2 OVERALL PLANNED AND UNPLANNED LONG INTERRUPTIONS  
(MINUTES LOST PER YEAR); ONLY COUNTRIES NOT EXCEEDING 400 MINUTES**

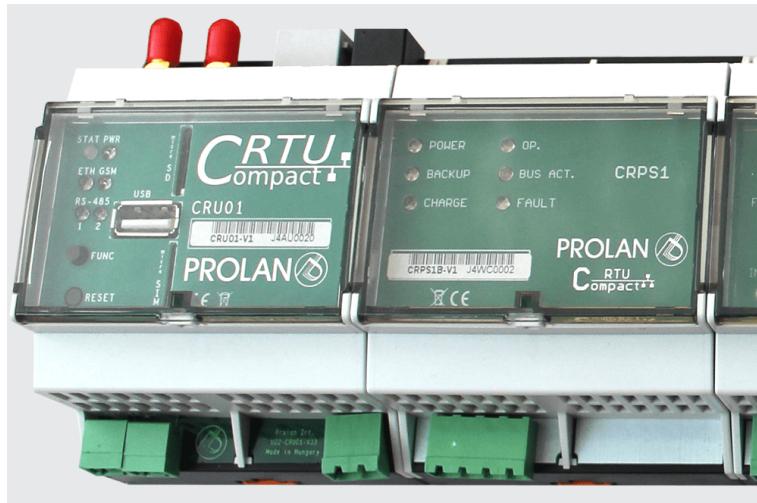


**1.2. ábra. Hosszú kimeradások ideje évente**

ba mutat, ahol a különböző hálózati paramétereket az energetikai szakemberek országos szinten, nagy részletességgel tudják elemezni, ezek alapján pedig növelni tudják a megbízhatóságot, hatásfokot. Ez a feladat egy pontos, megbízható, alacsony költségű kihelyezett adatgyűjtő eszközt igényel. Diplomamunkám keretében ennek az eszköznek a fejlesztését mutatom be.

## 2. fejezet

# C-RTU család

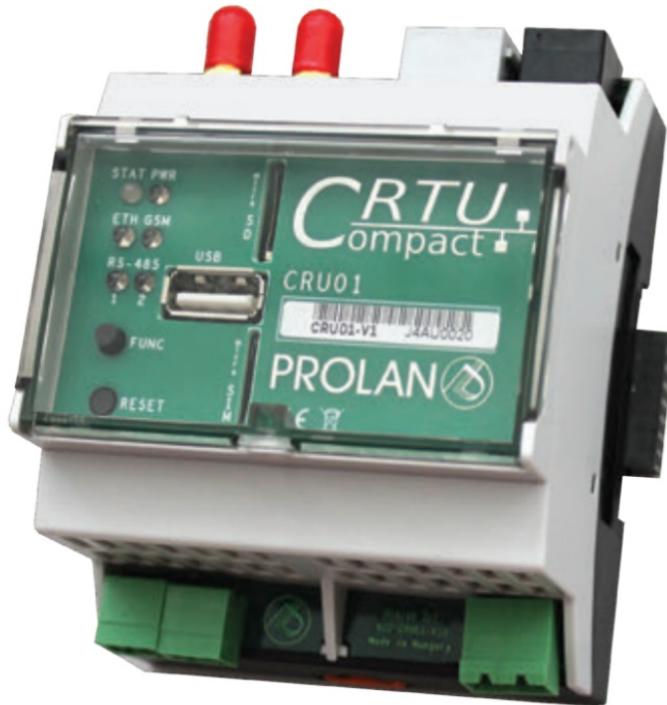


2.1. ábra. C-RTU család

A PROLAN Zrt. C-RTU családjával kisméretű, moduláris adatgyűjtő és vezérlő rendszereket lehet kialakítani, melyben egy alapkészülék, és egy, vagy több kiegészítő modul kap helyet. Az alapkészülék, amelyben egy Linux operációs rendszert futtató processzor kártya van, végzi el a különböző távoli és közeli kommunikációs feladatokat, valósítja meg a magasabb szintű logikát és feldolgozást, a kiegészítő modulok konfigurálását és menedzselését. Számos kiegészítő modul áll rendelkezésre, melyek CAN kommunikációval kapcsolódnak az alapkészülékhez egy moduláris hátlapi buszon keresztül. Ezek a modulok lehetnek például: digitális be- és kimenetek (CR-DIO), feszültség és árammérők (CR-MM4, CR-VM12, CR-PM12), tápkimaradás áthidaló okos tápegységek (CR-PS), különböző kommunikációs interfész biztosító kiegészítők (CR-OE) vagy akár elektromos jármű töltés vezérlők (CR-CC). A legtöbb kiegészítő modulban lévő, helyi mikrokontroller a C-RTU alapkészülékkel a hátlapi CAN buszon kommunikál. A kontroller látja el a modul specifikus feladatokat, az alapkészüléknek már csak a magasabb szintű logikát, feldolgozást kell megvalósítania Linux operációs rendszer alól.

Az általam tervezendő háromfázisú mérőmodul neve a családon belül CR-PM3.

## 2.1. Alapkészülék



2.2. ábra. C-RTU alapkészülék

Az alapkészülékben egy Ka-Ro electronics GmbH által gyártott "Computer-On-Module" található, ez a processzor egy-egy C-RTU alkalmazásnak a lelke. A modulon az NXP i.MX 6UltraLite MCIMX6G2-es processzora van, ez egy alacsony fogyasztású alkalmazás processzor. Emellé a modulon 4GiB eMMC társul, továbbá 256MiB SDRAM, valamint egy komplex tágáramkör, aminek már csak egy bemeneti feszültségre van szüksége a működéshez. Helyi kommunikációhoz, C-RTU rendszeren kívüli modulokkal 2 db RS485 port használható fel. Hardveresen vezeték nélküli opciók közül választhatunk 2G/3G/4G GSM, vagy LTE 450, vagy LoRa kommunikációból, illetve ezek helyett optikai Ethernetet. Mind-egyik alapkészülékben van továbbá egy réz alapú Ethernet port is. Az alapkészülék egy 4 modulhely (71.6mm) széles készülékházban kapott helyet.

## 2.2. Kiegészítő modulok

A kiegészítő modulok adják a C-RTU rendszerek flexibilitását, az alapkészülék mellé mindenig csak az éppen szükséges ki- és bemenetek kerülnek, ezzel minimalizálva a helyigényt, költségeket.

### 2.2.1. Egységes funkciók

Majdnem az összes modul STM32F303 alapú, az egyetlen kivétel ezalól a CR-OE modul, mivel azon nincs programozható mikrokontroller.

A modulok előlapján egységesen egy címbeállító dil switch kap helyet, amely segítségével a C-CAN címét tudjuk beállítani a modulnak, indulás után ez alapján tudja a modul, hogy mely üzenetek vonatkoznak rá. Az összes kiegészítő készülék, amely valamilyen mikrokontrollert tartalmaz, egy bootloader futtatásával indul, az alapkészülék ezen keresztül tudja akár távolról is frissíteni a firmware-t.

Minden modul előlapján helyet kapnak a következő LED-ek, előírt színnel, funkcióval:

1. *PWR LED*: Színe zöld, a modulban előállított egyik tápfeszültségről kell járatni.
  2. *STAT LED*: Színe zöld, egy processzor GPIO-nak kell vezérlenie.
  3. *FAULT LED*: Színe piros, egy processzor GPIO-nak kell vezérlenie.
  4. *BUS LED*: Színe citromsárga, egy processzor GPIO-nak kell vezérlenie.

Ezeken felül minden további, modul specifikus kommunikációnak citromsárga LED-ét kell működtetni, minden digitális bemenetnek narancssárgát, kimenetnek citromsárgát. Az összes LED-nek 3mm-es, víztiszta típusúnak kell lenni.

A CR-PM3 sajnos nem ezek az előírások alapján készült, mivel a prototípus az ezeket leíró dokumentum elkészülte előtt már meg lett tervezve és be lett ültetve, így az a korábbi előírásnak felel meg, ahol azonos funkciójú LED-ek kaptak helyet, de néhányuk más színnel volt előírva.

A modulok a hátlapon keresztül egy differenciális PPS jelet kapnak normál működés közben, ennek a megszűnésére hardveresen újra kell indítani a modulban található processzort. A modulok előlapján található még egy reset nyomógomb, amely rövid idejű lenyomásával szintén a processzor újraindítása érhető el.

A modulokon programozáshoz Tag-Connect típusú csatlakozók vannak elhelyezve, melyek alkatrész beültetése nélkül, egyszerűen NYÁK rajzolat kialakításával használhatók. Ez nem csak költséghatékony, de kisebb területet is foglal el az áramkör maradékától.

A modulok indulás után egy paraméterező fázisba kerülnek, ahol az alapkészülék a futársukhoz szükséges adatokat átadja. Ezt követően a kiegészítő készülékek életjelet küldenek, valamint a paramétereknek megfelelően adatokat. A különböző adatokat kétféleképpen küldhetik fel az alapkészüléknek:

1. *Ciklusidő alapján*: Előre beállított időnként a modul elküldi a figyelt változót, annak értékének változásától függetlenül.
  2. *Szignifikancia alapján*: Egy beállított különbséghatárérték átlépése esetén a változó új értékét elküldi az alapkészüléknek, majd onnantól kezdve ezt az új értéket veszi alapnak a változások figyelésénél.

## **2.3. C-CAN protokoll**

A kommunikáció az alapkészülék és modulok között egy CAN alapú, belső fejlesztésű C-CAN elnevezésű kommunikációval történik, ez speciális címzéseket és csomag típusokat definiál, egy masteres topológiával.

## **2.4. Mechanikai kialakítás**

A C-RTU család eszközei kalap profilú DIN-sínre szerelhetők, szemben a Prolan-ban eddig megszokott 19"-os rack-es kivitelű rendszerekkel. A család készülékei a Phoenix Contact BC moduláris készülékházait használják, melyek több méretben, kialakításban is elérhetők. A nyomtatott áramköri lapok elhelyezése számos módon történhet, az megoldható akár vízszintesen, akár függőlegesen. A sok rögzítési pont következtében kis kiterjedésű modulokat lehet létrehozni az úgynevezett "szendvics panel" kialakítással. A C-RTU családban modulonként általában 2 emelet van, illetve ezen felül egy, ami a készülék előlapját valósítja meg. Az előlap NYÁK-ból való megvalósítása először pazarlónak gondolhatnánk, azonban közepes gyártási darabszámnál, ahol előlapot marni, vagy szerszámmal gyártatni még túl drága lenne, nem emeli jelentős mértékben a költségeket, emellett könnyű tervezni, konzisztens és szép eredményt nyújt a sztenderd 0.15/0.15mm-es vezető/szigetelő technológiával. További előnye a megoldásnak, hogy a felhasználó által nem látható, belső oldalra alkatrészek ültethetők. Ez például a C-RTU alapkészüléknél ki van használva, ott két antennacsatlakozó kerül beültetésre igény szerint, amelyek mögött a réz rajzolaton egy-egy NYÁK antenna került elhelyezésre, így amennyiben a felhasználásai területre elég egy kisebb nyereségű antenna, a felhasználók plusz költség nélkül hozzáférnek ezekhez.

TODO

### 3. fejezet

## Rendszer jellemzők

A tervezendő adatgyűjtő rendszer a kihelyezett mérőpontokon a KIF és KÖF rendszer feszültségeihez közvetlenül, vagy feszültségváltókon, az áramaihoz közvetlen söntön, vagy áramváltókon keresztül csatlakozik. minden megoldásnál egyformán elvárás a szabványoknak való megfelelés és az ezzel járó szükséges feszültségtűrésű szigetelések. A lehetséges mérési megoldásokat az eszköz szempontjából meghatározó tulajdonságok alapján hasonlítom össze.

### 3.1. Specifikáció

A CR-PM3 egyik lehetséges felhasználása egy másik, a szintén Prolan által gyártott ProField mezőgép AF500-as moduljának kiváltása bizonyos alkalmazásokban. A ProField mezőgépet számos területen használják a hozzá kapcsolt technológiai folyamat jeleinek érzékelésére, illetve beavatkozási parancsok végrehajtására, például transzformátor alállomások és az energiaelosztó hálózatok különböző pontjain. Az AF500-as modul ezen a rendszeren belül precíz feszültség és áram mérések elvégzésre alkalmas, áram- és feszültségváltó transzformátorokon keresztül. Maga a ProField rendszer rack-es kivitelű, így helyigénye is nagyobb, mint egy C-RTU-val megvalósított alkalmazás. A hivatalos specifikációja a modulnak:

| Paraméter                          | Érték                                  |
|------------------------------------|--|
| Névleges fazisfeszültség-tartomány | 0-200VAC (RMS)                         |
| Teljes fázisfeszültség-tartomány   | 0-450VAC (Peak)                        |
| Névleges áramtartomány             | 0-1AAC / 0-5AAC (konfiguráció függő)   |
| Névleges frekvenciatartomány       | 45-55Hz                                |
| Névleges fázismérés-tartomány      | $\pm 180^\circ$                        |
| Működési hőmérséklettartomány      | 0...+55C° / -20...+70C° (verzió függő) |
| Pontosság                          | 0.5%                                   |

**3.1. táblázat.** AF500 ProField modul specifikációja

Az AF500 a következő adatokat szolgáltatja a ProField rendszerben:

1. *Vonalifeszültségek*
2. *Fázisfeszültségek*
3. *Fázisszögek*
4. *Fázisteljesítmények ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ )*
5. *Háromfázisú teljesítmények ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ )*
6. *Frekvencia*
7. *Zérus sorrendű feszültség és áramok*

A tervezendő modulnak a fenti tulajdonságokat, illetve funkciókat kell tudnia, vagy azokat meghaladnia, hogy versenyképes lehessen, ugyanakkor alacsonyabb önköltséggel kell megoldani a feladatot.

### **3.2. Feszültségmérés**

A hálózati feszültség mérése egy alapvető feladata lesz a tervezendő készüléknek, az optimális mérési elv kiválasztása meghatározó fontossággú. Vegyük számításba a lehetséges megoldásokat.

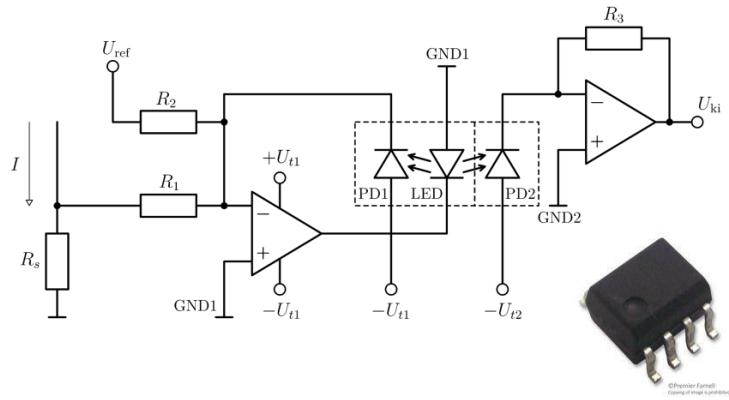
#### **3.2.1. Feszültségváltó transzformátor**

Egy precízen tekercselt mérőtranszformátor segítségével az 50Hz-es váltakozó feszültséget leválaszthatjuk és letranszformálhatjuk a mérési tartományunkra, ezt egy nagy impedanciás mérővel feldolgozhatjuk, így a transzformátor gyakorlatilag üresjárásban üzemel. A feszültségváltó transzformátor jellemző hibája az áttételi hiba, vagyis a névleges áttételtől való eltérés, illetve a szöghiba, amely a primer és szekunder oldal közötti fáziseltolás. A túlfeszültséget jól tolerálja, a szükséges szigetelési szilárdság könnyen megvalósítható. Méretében a többi megoldáshoz képest nagy, a precízebb, például 0.1 pontossági osztályú, kis szöghibájú típusok ára jelentős.

#### **3.2.2. Ellenállásosztó és izolációs erősítő**

A készülék bemeneti feszültségét egy nagy impedanciás ellenállás osztón keresztül leképezzet, majd egy izolációs erősítő bemeneti tartományára, majd egy izolációs erősítővel elérhetjük a megfelelő szigetelési szilárdságú galvanikus leválasztást. Az izolációs erősítő működhet optikai, induktív vagy kapacitív elven. Az induktív elvűek esetében az analóg bemeneti jelet digitálissá alakítják, majd a tokozáson belül kialakított légmagos transzformátorok segítségével, a mágneses téren keresztül választják le a jelet, majd alakítják vissza analógá. Ez a megoldás akár kis teljesítményű leválasztott tápok kialakítását is lehetővé teszi.

a digitális jelek átvitele mellett. A kapacitív elven működő izolátorok szintén digitalizálják a bemeneti jelet, majd a szilícium lapkákon kialakított nagyfeszültségű kondenzátorok segítségével, az elektromos téren keresztül juttatják át a a jelet a fogadó oldalra, ahol visszaalakítják analóg jellé. Az induktív és kapacitív izolátorok digitális átviteli megoldása kiküszöböli az optikai izolációs erősítők legfőbb problémáját, az öregedés következtében fellépő paraméter változásokat. Az optikai elvű analóg leválasztók egyik speciális típusa a lineáris optocsatoló, amelyben egy tokozáson belül egy infra LED-hez két fotodióda tartozik. Ezt az alkatrészt egy műveleti erősítős szabályzókkal kiegészítve minden a két oldalon egy olyan megoldást kapunk, amelynek az átvitelét az öregedés nem befolyásolja jelentősen, azt a műveletierősítők kikompenzálják.



**3.1. ábra.** Lineáris optocsatolós analóg jel leválasztás

## TODO CITÁCIÓ AUT-BME-KÉSZÜLÉK-ÉRZÉKELÉS

### 3.2.3. Ellenállásosztó és leválasztott ADC

Hasonlóan az előző megoldáshoz, egy ellenállás osztóval kell leképezni az ADC mérési tartományára a feszültséget, majd az átalakítást követően a digitális kommunikációt kell leválasztani. A digitális kommunikáció leválasztására számos izolátor és optocsatoló típus áll rendelkezésre, melyek költsége alacsonyabb, mint az analóg izolációs erősítőké.

### 3.2.4. Feszültségmérési megoldások összehasonlítása

Vessük össze a felsorolt feszültségmérési módokat a legfontosabb jelemzőik alapján:

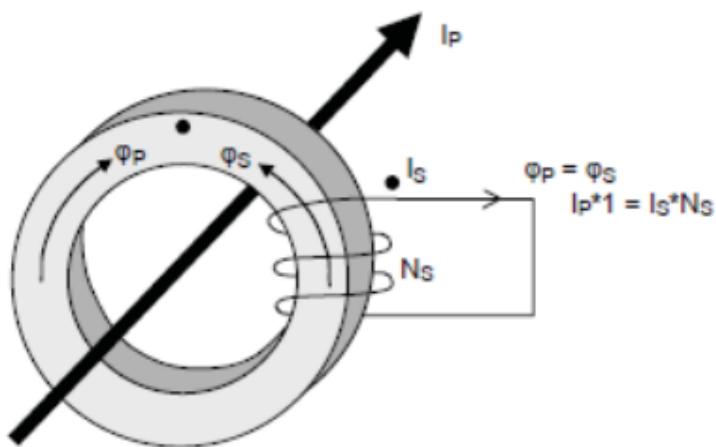
## 3.3. Árammérés

Az árammérés eredményéből következtethetünk a terhelés nagyságára, jellegére. Az árammérést ugyanúgy feszültségmérésre vezetjük vissza a megoldások döntő többségében, így ez a konverzió egy plusz hibát visz a mérésbe, éppen ezért az árammérés valamivel minden pontatlanabb lesz, mint a feszültségmérés.

| Szempont               | Feszültségváltó | Ellenállásosztó és izolációs erősítő | Ellenállásosztó és leválasztott ADC |
|------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Elérhető pontosság     | Alacsony        | Magas                                | Magas                               |
| AC/DC mérés            | AC              | AC és DC                             | AC és DC                            |
| Frekvencia tartomány   | Kicsi           | Közepes                              | Nagy                                |
| Galvanikus leválasztás | Inherens        | Analóg szükséges                     | Digitális szükséges                 |

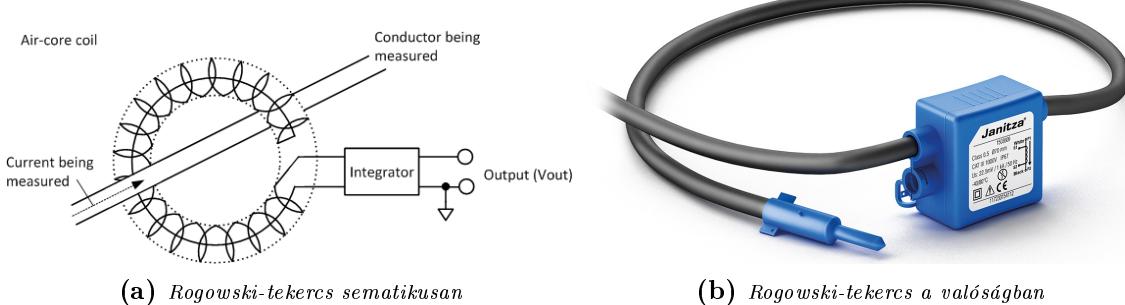
3.2. táblázat. Feszültségmérési megoldások

### 3.3.1. Áramváltó transzformátor



3.2. ábra. Áramváltó transzformátor működési elve

A feszültségváltó transzformátorhoz hasonló megoldással az árammérés is megoldható. A transzformátor kialakítását tekintve a szekunder oldal fix menetszámmal rendelkezik, míg a primer oldalon az adott felhasználásnak megfelelő menetszámban kell átfűzni egy nagyobb áramú vezetőt. Itt a menetszám tipikusan kevés, leggyakrabban 1-3 közötti. A szekunder oldalt egy minél alacsonyabb értékű sönt ellenállással zárjuk le, ezzel próbáljuk közelíteni a transzformátor rövidzárási állapotát. A szekunder oldali áramot mérve tudunk ezután következtetni a primer áramra, mivel az áttétel előre ismert. A feszültségváltó transzformátorral hasonló módon méretét tekintve nagy, precízebb típusok költségesek. Gyártanak bontható típusúakat is, azonban ezek tovább emelik a szenzor transzformátor árát. Egy jelentős hátrány, hogy lezáratlan állapotban életveszélyes feszültségek jelennek meg a szekunder oldalon már alacsonyabb primer áramknál is. Ez utóbbi abból következik, hogy még normális működés közben a primer és szekunder oldalon keletkező fluxus azonos nagyságú és ellentétes irányú, ezzel kioltva egymást, addig a szekunder oldali szakadás esetén a vasmagban kialakuló fluxus megnő, a szekunder tekercselésben az feszültséget indukál, az pedig a transzformátor tönkrementeléhez vezethet, vagy pedig a telepítő szakembert veszélyeztetheti, ezért a telepítésénél kellő figyelemmel kell eljárni, a szekunder oldalt rövidzában kell tartani, vagy a primer oldali áramot 0-án kell tartani a szekunder lezárásaig.



**3.3. ábra.** *Rogowski-tekercs*

### 3.3.2. Rogowski-tekercs

Egy olyan speciálisan kialakított tekercs, mely gyakran flexibilis, nyitható kivitelű. Ez lehetővé teszi az üzem közbeni felszerelést a mérőnek, nem kell az áramszolgáltatást szüneteltetni. A tekercs közepén átfolyó áram változásával arányos feszültség indukálódik, azt integrálva az áram értékét nagy pontossággal meg tudjuk határozni. Magas frekvenciáig, nagy áramok esetében is használható, például tranziensek vizsgálatához. Ma már tisztán nyomtatott áramkörön is kialakítható, azonban ezek pontossága még nem éri el a tekercselt kivitelűekét. A pontosabb kivitelű típusok ára magas.

### 3.3.3. Sönt ellenállás és izolációs erősítő

Egy egyszerű sönt ellenállás és egy izolációs erősítő alkalmazásával kis helyen, nagy precizitással elő tudjuk állítani a leválasztott, árammal arányos feszültség értéket, amit már a feldolgozó egység képes fogadni. Egy jelentős hátránya ennek a megoldásnak az ellenálláson fellépő disszipáció, illetve a szükséges izoláció. A mérési pontosság növelésének érdekében érdemes Kelvinni bekötést alkalmazni. Ekkor valójában egy 4 vezetékes mérést valósítunk meg, biztosítjuk, hogy az árammérésből származó feszültséget egy külön vezetőn juttassuk el a feldolgozó bemenetéig. Választhatunk kifejezetten erre kialakított, 4 terminális ellenállásokat is, melyekkel tovább növelhető a pontosság.

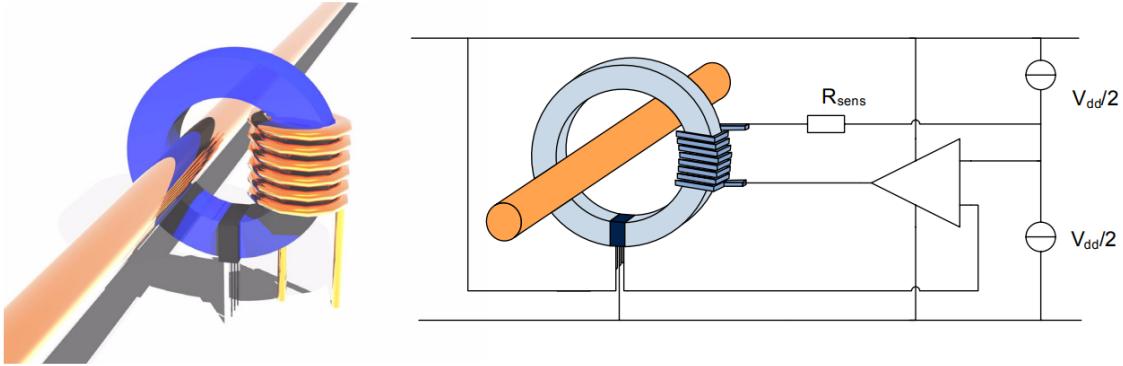


**3.4. ábra.** *Négy kivezetéses árammérő sönt*

### 3.3.4. Hall-szenzoros árammérő

A Hall-szenzor alapú árammérőket manapság már feldolgozó elektronikával egy tokba integrálva is be lehet szerezni, kitűnő dinamikus tulajdonságokkal rendelkeznek, alkalmasak

DC áramok mérésére, a mérendő áramot nem szükséges egy ellenálláson keresztül vezetni és így feszültséget ejtetni, az áram nagysága az általa keltett mágneses mezőn keresztül van mérve, a Hall-effektust kihasználva, így a leválasztás a mágneses téren keresztül valósul meg. Pontos mérésekhez a külső mágneses tér zavaró hatása ellen speciális mérési eljárássokkal lehet védekezni, mely során több, egymás mellett elhelyezett Hall-szenzor kimenétét kell mérni, azok segítségével pedig kiszűrhető a külső tér zavaró hatása.



**3.5. ábra.** Kompenzált Hall-szenzoros árammérő fluxus koncentrátorral

Egy másik Hall-szenzor alapú megvalósítás egy fluxus koncentrátor alkalmazása, amely a mérendő vezető körül mágneses hurkot a Hall-szenzorhoz vezeti. A mágneses koncentrátorok a nulla térerősség körül működnek a leg pontosabban, így egy további műveletierősítő áramkörrel ezt kompenzáálhatjuk, mint például a 3.5-as ábrán. A pontosabb szenzorok ára viszonylag magas. Személyes, és munkatársaim tapasztalata, illetve egyetemi tanulmányaim alapján az integrált szenzoroknak a kimeneti jele rendkívül zajos, egy precíz mérőműszerbe nem megfelelők.

### 3.3.5. Árammérési megoldások összehasonlítása

Most vessük össze a főbb szempontok alapján a felsorolt megoldásokat, hogy egy helyen tudjuk összehasonlítani a különböző árammérési módok tulajdonságait:

| Szempont                | Áramváltó | Rogowski-tekerces | Sönt             | Hall-szenzor |
|-------------------------|-----------|-------------------|------------------|--------------|
| Elérhető pontosság      | Közepes   | Alacsony          | Magas            | Közepes      |
| AC/DC mérés             | AC        | AC                | AC és DC         | AC és DC     |
| Feldolgozás             | Egyszerű  | Bonyolult         | Egyszerű         | Egyszerű     |
| Túláram tolerancia      | Magas     | Magas             | Alacsony         | Magas        |
| Frekvencia tartomány    | Kicsi     | Nagy              | Nagy             | Közepes      |
| Galvanikus le-választás | Inherens  | Inherens          | Analóg szükséges | Inherens     |

**3.3. táblázat.** Árammérési megoldások

### **3.4. Adatfeldolgozás**

A lehetséges szenzor megoldások megismerése után nézzük milyen lehetséges jelfeldolgozók közül választhatunk. Az adatok feldolgozása itt a következő műveletsort jelenti:

1. *AD értékek kiolvasása*
2. *Fázis kompenzáció*
3. *AD értékek leképezése valós mennyiségekre*
4. *Offset eliminálása*
5. *Hőmérséklet kompenzáció*
6. *RMS értékek előállítása*
7. *Hatásos és meddő teljesítmények számolása*
8. *Energiák akkumulálása*
9. *THD számítása*
10. *Hálózati események figyelése és rögzítése*
11. *Adatok biztosítása egy kommunikációs interfészen*

Az AD értékek kiolvasását nagyobb gyakorisággal kell végrehajtani, illetve ezt átlagolni, a műveletsor maradékát pedig hálózati periódusonként (20ms) végrehajtani fázisonként. A feladatok jellegüket tekintve az egyes fázisokon belül sorosak, végig kell számolni a feszültség és áramértékektől az energiáig minden, de a fázisok között párhuzamos végrehajtás is megengedhető, habár időben egymástól egyenletesen vannak eltolva a periódusok, így az soros végrehajtással is megoldható, amennyiben  $\frac{20}{3}ms$  alatt lefut egy fázis feldolgozása.

#### **3.4.1. Mikrokontroller**

A mikrokontrollerek gyártónként és családonként is nagyon széles palettán mozognak, a DSP-k és egyszerű MCU-k határvonala összefolyik. Az egyszerűség kedvéért gondoljunk itt egy 32 bites példányra, amelyben nincs lebegőpontos segédprocesszor (FPU). Ez utóbbi az egyszerű mikrokontrolleres megoldást sajnos használhatatlanná teszi, mivel minden lebegőpontos számítást szoftverből kell megoldania, az pedig többszörös végrahajtási időt jelent műveletenként. Ezt a megvalósítást akkor választhatjuk, ha a feldolgozás egy jelentős részét átadjuk a rendszer magasabb szintjeinek.

### **3.4.2. Digitális Jelfeldolgozó Processzor**

Az első lehetséges megoldás egy saját fejlesztésű szoftvert futtató digitális jelfeldolgozót tartalmaz, ez végzi el a méréseket, kompenzációt, valamint számolja ki a hálózati jellemzőket a mért feszültség- és áramértékekből. Ennek a megoldásnak előnye a flexibilitás, illetve, hogy nem tartalmaz "fekete dobozokat", vagyis nem ismert belső működésű blokkokat. A piacra elérhető számos jelfeldolgozó processzor, így a tervező a célalkalmazásnak megfelelő típust tud kiválasztani.

### **3.4.3. Programozható Logika**

Az alkalmazás megvalósítható konfigurálható logikai eszközökkel is, például FPGA-val. A párhuzamosan működő blokkok jelentős számítási teljesítménnyel bírnak, digitális jelfeldolgozáshoz kitűnően használhatók. Amennyiben szükséges soft-core processzor szintetizálható a rendszerbe, kiegészítve ezzel a párhuzamosan futó blokkokat egy soros végrehajtású CPU-val. A feladat bonyolultságát figyelembe véve egy kisebb teljesítményű FPGA is kiélegítő lehet, azonban még ezek ára is igen magas, illetve legtöbbük BGA tokozású, amely kisebb szériás termékek esetén, illetve prototípus gyártásnál problémákat okozhat. Egy előnye a programozható logikának, hogy egy konkrét típus megszűnése esetén az áttérés egy másik eszközre viszonylag egyszerű az univerzális leíró nyelveknek köszönhetően.

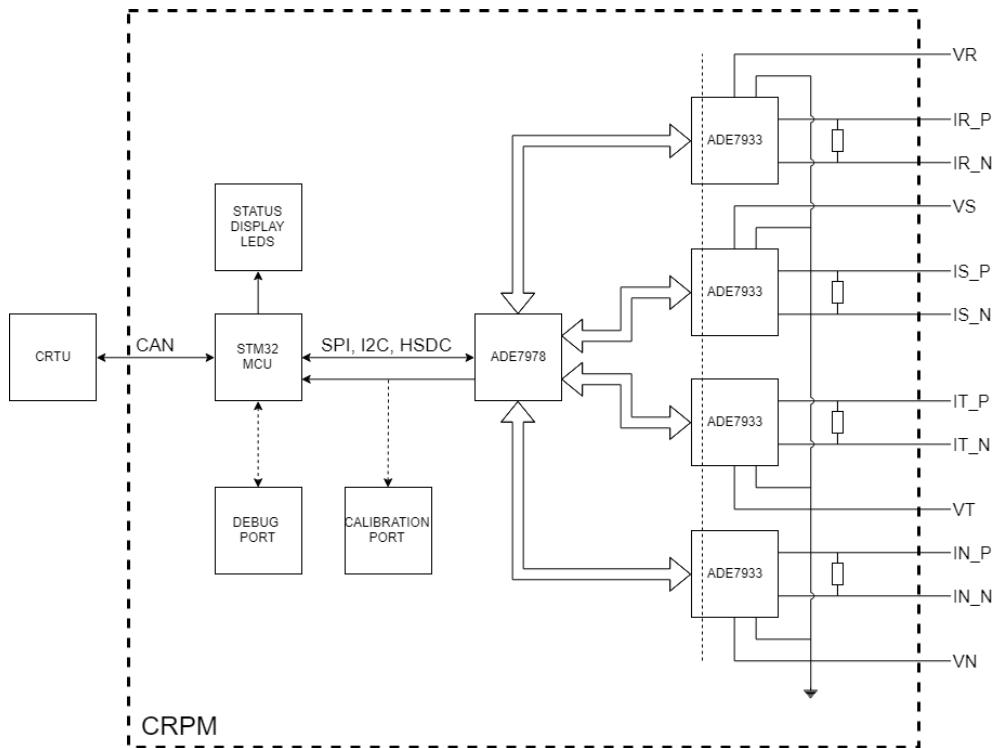
### **3.4.4. Mérő IC, beégetett DSP kóddal**

Több gyártó kínál komplett megoldásokat egy tokban realizálva. Ezek tartalmazzák az analóg front-end-et, nagy felbontású analóg-digitális átalakítót, valamint egy előre felprogramozott digitális jelfeldolgozó processzort. Az Analog Devices egyik termékcsaládja még 5kV RMS izolációt is biztosít a digitális interfészhez egy tokban, illetve ugyanitt leválasztott segéd tápot is előállít a mérő oldalnak. Ezeknek a megoldásoknak előnye a remek pontosság, jó paraméterezhetőség, illetve a sokkal rövidebb fejlesztési idő. A különböző kompenzációs algoritmusok minden implementálva vannak, a fejlesztőnek az alkalmazáshoz megfelelően fel kell konfigurálnia a mérőt, majd a kész adatokat kell kiolvasnia és felhasználnia. Közös hátrány azonban, hogy a gyártó bármikor kivonhatja az adott típust a forgalomból, így a fejlesztőnek át kell terveznie a terméket, új szoftvert kell fejleszteni, újra bevizsgáltatnia, ami költséges és időigényes lehet, ezért ennél a megoldásnál elengedhetetlen utánánézni az adott alkatrész beszerezhetőségének.

## **3.5. Választott megoldás**

A felsorolt tulajdonságokat összevetve, illetve súlyozva azok fontossága szerint, feszültségméréshez az Analog Devices ADE7978 beégetett kódú DSP-jét, illetve az ehhez a családhoz

tartozó ADE7933-as, 3 analóg-digitális átalakítót, 5kV-os digitális izolációt, illetve tápleválasztást tartalmazó mérő IC-t választottam. Ez a típus elsősorban sönt ellenállásos árammérést támogat. Ezekkel az alkatrészekkel a specifikáció kielégítéséhez szükséges pontosságú, kis méretű megoldást lehet kialakítani. A választott megoldás ugyan áramméréshez sönt ellenállást használ, azonban ennek értéke rendkívül alacsony, mivel az ADE7933 árammérő bemenetén a feszültség +31.25mV, amennyiben ehhez a 6mOhmos tervezett mérősortőt vesszük, a maximális disszipáció nem haladja meg a 100mW-ot sem, így a választott mérési elv nem jár jelentős hőfejlődéssel.



**3.6. ábra.** Rendszer felépítése

Egy használható áramváltó, melyet később a tesztalkalmazásban is választottam, a Schneider Electric 16451-es 50/5-ös áramváltó transzformátora. Ezzel a 32A-re biztosított vonalak árama jól fedi a tervezett mérési tartományt. Az áramváltó primer vezetékének átmérője maximálisan 21mm, a szekunder oldali kivezetésre villás sarukkal lehet csatlakozni. A transzformátor pontossági osztálya a terhelés nagyságától függ, a TODO TODO táblázat mutatja a garantált értékeket.

|    |     |      |     |
|----|-----|------|-----|
| CI | 0,5 | 1    | 3   |
| VA |     | 1,25 | 1,5 |

**3.4. táblázat.** 16451-es áramváltó transzformátor pontossága terhelés függvényében

Mivel a mérő az árammérő csatornán kevesebb mint 100mW-ot disszipál el, így legalább 1%-os pontossággal számolhatunk kalibráció nélkül.

Maga a mérő, mivel minden csatorna izolálva van egymástól, akár áramváltó transzformátor nélkül is alkalmazható, így az egyes csatornák a fázisok potenciáljára kerülnek. Az

elrendezést a mérő IC adatlapjában is feltűntetik.

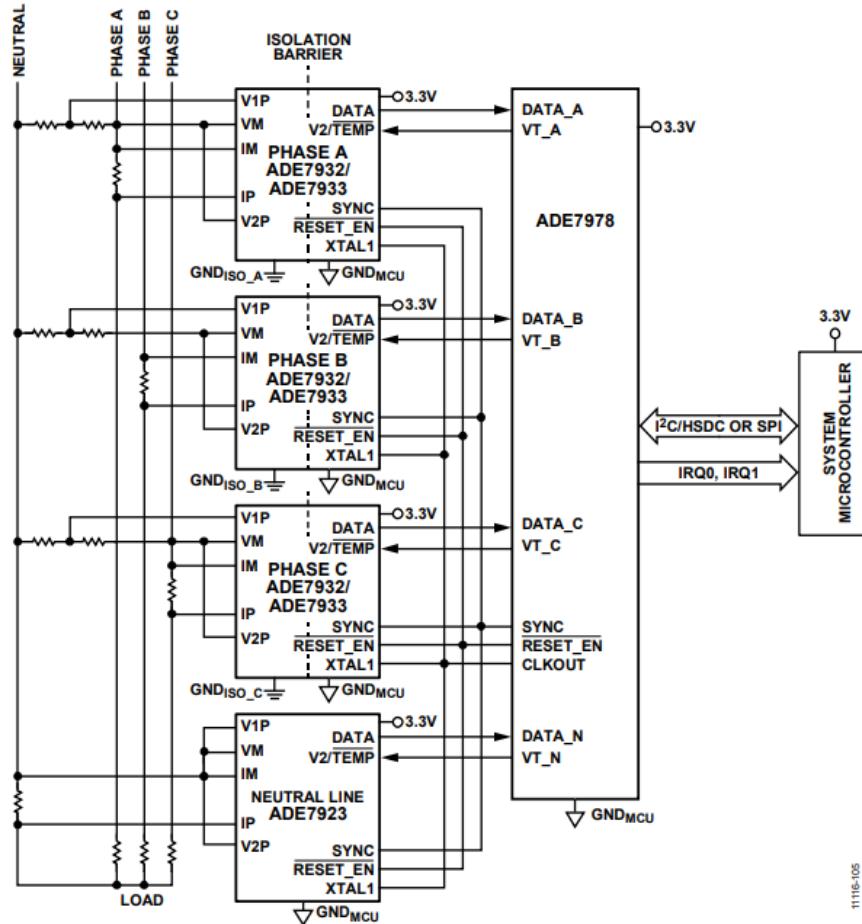


Figure 111. 3-Phase, 4-Wire Wye Meter with One ADE7978, Three ADE7933/ADE7932 Devices, and One ADE7923

**3.7. ábra.** Áramváltó nélküli mérési elrendezés

### 3.5.1. Elméleti specifikáció, funkcionalitás

A rendszer felépítésének megtervezése után vessük össze az elméleti pontosságokat, illetve kinyerhető adatokat a ProField AF500-as modul értékeivel a 3.1-es táblázat alapján.

0.1%-os alkatrészek alkalmazásával az ADE7978 adatlapja a következő tipikus pontossági értékeket adja meg:

Az AF500-zal összevetve az elméleti pontosság tekintetében a CR-PM3 képes lehet jobb eredményeket szolgáltatni megfelelő kalibrációval, alkatrészválasztással. Nézzük meg, milyen információkat nyerhetünk ki közvetlenül a mérő IC-ből, megfelelő regiszter konfigurálás után:

1. *Effektív fázis feszültségek*
2. *Effektív fázis feszültségek alapharmonikusa*

| Paraméter                     | Tipikus érték           |
|-------------------------------|-------------------------|
| Hatásos teljesítmény          | 0.1% (Kompenzáció után) |
| Meddő teljesítmény            | 0.1% (Kompenzáció után) |
| Mérési sávszélesség           | 3.3kHz                  |
| Effektív feszültség           | 0.1%                    |
| Effektív áram                 | 0.25%                   |
| Névleges frekvenciatartomány  | 45-65Hz                 |
| Működési hőmérséklettartomány | -40...+85C°             |

**3.5. táblázat.** ADE7978 tipikus pontossági értékei 0.1%-os alkatrészek alkalmazásával

3. *Effektív fázis áramok*
4. *Effektív fázis áramok alapharmonikusa*
5. *Fázisonkénti teljes hatásos energia*
6. *Fázisonkénti alapharmonikushoz tartozó hatásos energia*
7. *Fázisonkénti teljes meddő energia*
8. *Fázisonkénti alapharmonikushoz tartozó meddő energia*
9. *Fázisonkénti látszólagos energia*
10. *Feszültség csúcs egy előre megadott hálózati periódus számban*
11. *Fázisonkénti áram csúcs egy előre megadott hálózati periódus számban*
12. *Fázisonkénti túláram esemény (Egy konfigurálható határértékhez képest)*
13. *Fázisonkénti túlfeszültség esemény (Egy konfigurálható határértékhez képest)*
14. *Fázisonkénti feszültség letörés esemény (Egy konfigurálható határértékhez képest)*
15. *Fázisonkénti teljes hatásos teljesítmény*
16. *Fázisonkénti teljes meddő teljesítmény*
17. *Fázisonkénti teljes hatásos teljesítmény*
18. *Fázisonkénti teljes látszólagos teljesítmény*
19. *Fázisonkénti teljes harmonikus torzítás a feszültségen*
20. *Fázisonkénti teljes harmonikus torzítás az áraban*
21. *Fázisonkénti zérus terhelés esemény (Egy előre konfigurálható határértékhez képest)*
22. *Fázisonkénti teljesítmény tényezők*
23. *Fázisonkénti hálózati periódusidők*

Ezek mellett rendelkezésre áll a nullvezető effektív árama, valamint az összes pillanatnyi kiolvasott érték 8kSPS gyakorisággal. Látható, hogy azokat az igényeket, amelyeket az AF500 funkcionálitás kielégített, a CR-PM3 is ki fog tudni szolgálni, illetve utóbbi további hasznos információkat szolgáltathat igény szerint, melyek az AF500-nál még nem álltak elő.

## 4. fejezet

# Hardver konstrukció

A CR-PM3 tervezése során mindenéppen figyelembe kellett venni, hogy ez később egy eladásra szánt termék lesz, így az igényeknek, szabványoknak megfelelve, egy lehetőleg minimális önköltségű terméket adhassak ki a kezeim közül.

### 4.1. Követelmények

A termékszabványok egy-egy készülékkel szemben egyértelmű követelményeket támasztanak. Ez utóbbinak való megfelelést, a funkcionalitás stabil és kielégítő kialakítását, valamint az önköltség minimalizálását kell megfelelően megválasztani. Az önköltség csökkentéséhez a hardverfejlesztőnek az alábbi eszközei vannak:

- Nyomtatott áramkör kialakítása:* Itt törekedni kell a NYÁK gyártó technológiájának megfelelően tervezni, hiszen a túl vékony vezető vagy szigetelő, túl apró furat használata jelentősen emelheti az összes legyártott NYÁK árát.
- Alkatrészek megválasztása:* Természetesen az alacsonyabb költségű alkatrészek csökkentik az összköltséget, azonban ez egy kétélű fegyver, mivel általában az olcsóbb alkatrészek kevésbé megbízhatóak, vagy kisebb biztonsági tényezővel járnak.
- Alkatrészértékek megválasztása:* Amennyiben egy ellenállás, kondenzátor, vagy induktivitás értéke nem kritikus, akkor azokat összevonhatjuk közelé értékű társaikkal, például felhúzóellenállások esetén az egész termékben ugyanazt az értéket használjuk. Ez a gyártás során csökkenti az értéket, mivel a beültető gépbe több tekercs helyett csak egyet kell befogni, ezzel gyorsítva a folyamatot.
- Alkatrészek elhelyezése:* Szintén a gyártási folyamat költségét tudjuk csökkenteni, amennyiben ugyanazon a fázison csak egyszer, vagy egyszer sem kell átvinni az áramkört. Például ha felületszerelt alkatrészeket a NYÁK csak egyik oldalára tesszük, akkor az a reflow kemencén csak egyszer halad át, amennyiben pedig nem használunk furatszerelt alkatrészt, a forrasztó hullámon egyszer sem halad át. Természetesen fő

szempontnak a funkcionalitásnak kell lenni, nem szabad például egy mechanikailag kevésbé stabil csatlakozót használni a költség optimalizálás miatt.

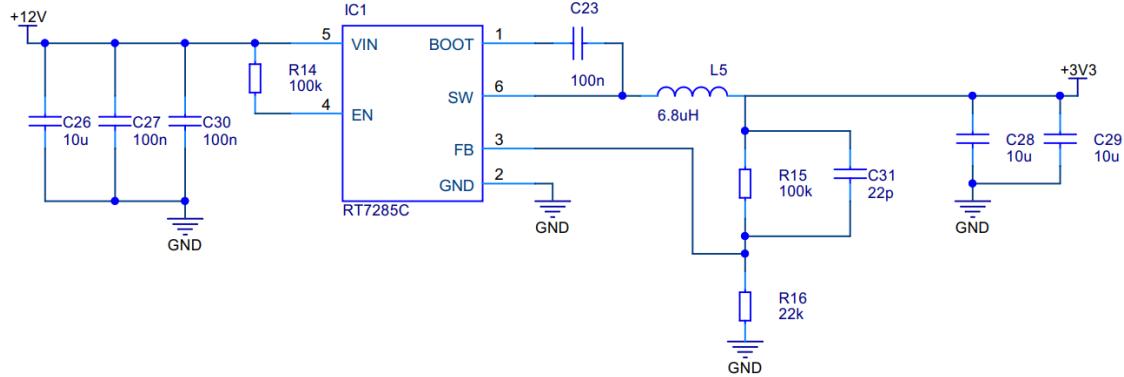
## 4.2. Kapcsolási rajz

A kapcsolási rajzot OrCAD Capture-ben hoztam létre, melynek számos funkciója segíti a tervező mérnökök, illetve a gyártás előkészítés munkatársainak közös munkáját. A tervező az alkatrész lehelyezésekor láthatja, hogy az adott komponensből hány darab van raktáron, mennyi annak a beszerzési ára, így elkerülhetőek az olyan szituációk, hogy egy már nem beszerezhető, vagy feleslegesen drága alternatíva kerül egy új termékbe.

A CR-PM3C-n egy 3.3V-os tápegységet és a hátlapi buszfeszültség visszaolvasását leszármítva tisztán digitális áramkörök helyezkednek el. Ezen a NYÁK-on a főbb komponensek:

1. *C-CAN címbeállító switch*: Ez egy 4 karos kétállású kapcsoló, melynek az állását inicializáció során olvassa ki a kontroller, így a C-RTU rendszeren belül beállítható a címe a modulnak. Ez minden kiegészítő modullal szemben elvárás.
2. *3.3V-os tápegység*: Ez a Richtek RT7285/A kapcsolóüzemű tápegységén alapul, a hátlapi 12V-ból állítja elő a modulnak szükséges tápfeszültséget.
3. *Előlapi LED-ek*: A C-RTU moduloknak előírt színű LED-ek. Funkcióik sorban: stárusz, busz kommunikáció, hiba, L1 fázis, L2 fázis, L3 fázis, illetve a DSP által vezérelt CF1 és CF2, konfigurálható jelentéssel.
4. *Mikrokontroller*: Az STM32F303-as mikrokontroller, illetve a működéshez szükséges alkatrészek.
5. *DSP*: Az ADE7978-as égetett kódú DSP.
6. *CAN meghajtás*
7. *Reset/PPS áramkör*
8. *Reset gomb*
9. *Debug UART csatlakozó*: A fejlesztéshez használandó, ESD védelemmel van ellátva.
10. *Programozó csatlakozó*
11. *Busz és emelet csatlakozók*: Samtec "Pass-Through" keresztülmenő hüvellysorok.

A CR-PM3A-n a 4 darab ADE7933-as mérő IC, illetve az ezekhez szükséges alkatrészek, az emeleti tűsor csatlakozó, továbbá a csatornák védelmei, a mérő söntök, a nagyfeszültségű ellenállás osztók és a KIF csatlakozók találhatók.



**4.1. ábra.** *RT7285/A alapú kapcsolóüzemű tápegység*

#### 4.2.1. Kapcsolóüzemű tápegység

A 12V-os hátlapi buszfeszültségről elő kell állítani a készülék működéséhez szükséges 3.3V-os tápfeszültséget, ehhez pedig a Richtek 7285/A-s kapcsolóüzemű táp IC-jét választottam rendkívül alacsony költsége, minimális külső alkatrészsigény miatt.

Az IC fontosabb jellemzői a 4.1-es táblázatban láthatóak.

| Paraméter                        | Érték        |
|----------------------------------|--------------|
| Bemeneti feszültségtartomány     | 4.3...18V    |
| Kimeneti feszültségtartomány     | 0.6...8V     |
| Maximális konstans kimeneti áram | 1.5A         |
| Kapcsolási frekvencia            | 500kHz (fix) |
| Maximális kitöltési tényező      | 90%          |
| Működési hőmérséklettartomány    | -40...85°C°  |
| Tokozás                          | SOT-23-6     |

**4.1. táblázat.** *RT7285/A fontosabb jellemzői*

Kapcsolóüzemű tápegységek tervezésénél gyakran ökölszabályokból indulunk ki, vagy már meglévő kapcsolásokból építkezünk. A következőkben bemutatom a tápegység méretezését.

Először is sorra kell vennünk a "fix" paramétereiket, melyek a következők:

$$V_{IN} = 12V$$

$$V_{OUT} = 3.3V$$

$$f_{SW} = 500kHz$$

$$I_{OUT(MAX)} = 1.5A$$

Ezek után meghatározzuk a megengedhető áramhullámosságot. Ezt egyszerűen ökölszabály alapján tesszük, általában a maximális áram 20...50%-a közé szokás választani, az alkatrész méret illetve a kimeneti feszültséghullámosság kompromisszumos megválasztásával. Jelen alkalmazásban, mivel a fontos analóg mérések csak az izolált oldalon vannak, amellyek

maguknak egy külön leválasztott táppal állítják elő a feszültséget, nem kritikus az alacsony hullámosság, legyen

$$\Delta I_L = 0.75A$$

Ezután már a szükséges induktivitás értéke számolható:

$$L = \frac{V_{OUT} * (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} * f_{SW} * \Delta I_L} = \frac{3.3V * (12V - 3.3V)}{12V * 500kHz * 0.75A} = 6.38\mu H$$

Az ehhez legközelebbi sztenderd érték 6.8  $\mu H$ , így az áramkörben ezt választottam. Természetesen el lehet térti ettől az értéktől mind a két irányban. Amennyiben nagyobb induktivitást alkalmazunk, csökkentjük az áramhullámosságot, ezzel pedig a kimeneten fellépő feszültséghullámosságot, de cserébe rontjuk a tranzisztorokat a tápnak, mivel az induktivitás áramát lassabban tudjuk növelni. Egy alacsonyabb érték választása esetén az előzővel éppen ellentétesen változnának a paraméterek: Gyorsabb kiszabályzás, de nagyobb feszültséghullámosság a kimeneten.

Ezek mellett természetesen figyelembe kell vennünk a tekercs telítési áramát, amelynek minimális értéke:

$$I_{SAT} = +I_{OUT(MAX)} + \Delta I_L$$

Ezek után a be- és kimeneti kapacitások meghatározása következik.

A bemeneti kapacitásra a kapcsolások miatt kialakuló, gyors fel és lefutású áramtüskék miatt van szükség. A kondenzátoroknak kell szolgáltatniuk a szükséges áram egy részét, illetve kisimítaniuk a feszültséget a kapcsolóelemek előtt. A bemeneten fellépő 500kHz-es áramhullámosság, amelyet a kondenzátoroknak kell elviselni:

$$I_{RMS} = I_{OUT(MAX)} * \sqrt{\frac{V_{IN}}{V_{OUT}} - 1} = 1.5A * \frac{3.3V}{12V} * \sqrt{\frac{12V}{3.3V} - 1} = 0.67A$$

Mivel a gyártók gyakran nem közölnek kerámia kondenzátorra maximálisan megengedhető áramhullámosságot, így a bemeneten inkább több kondenzátort helyeztem el párhuzamosan, két 100nF-os kondenzátort a nagyobb frekvenciákra, illetve egy 10 $\mu$ -os kondenzátort az alacsonyabb frekvenciás szűrésre.

A kimeneti kapacitás értéke, illetve a kondenzátor soros ellenállása (ESR) határozza meg a tár feeszültséghullámosságát:

$$V_{RIPPLE} = V_{RIPPLE(ESR)} + V_{RIPPLE(C)}$$

$$V_{RIPPLE(ESR)} = \Delta I_L * R_{ESR}$$

$$V_{RIPPLE(C)} = \frac{\Delta I_L}{8 * C_{OUT} * f_{SW}}$$

Természetesen ezek a képletek csak folytonos üzemre igazak, szaggatott üzemben a feeszültséghullámosságot teljesen más, bonyolultabb képletekkel lehet számolni, azonban attól most tekintsünk el. Kis méretű SMD kerámia kondenzátorok tipikus ESR-je 10m $\Omega$  alatti,

így én a legrosszabb esetet tekintve  $10m\Omega$ -mal számolok. A kimeneti kapacitást első körben vegyük  $20\mu F$ -nak, vizsgáljuk meg, hogy ez elég-e. A tényleges eszközben a különböző IC-k mellett összesen ennél nagyobb kapacitás lesz, azonban mi egy minimumot számolunk, a több kondenzátor hatására csak csökkenni fog a feszültséghullámosság.

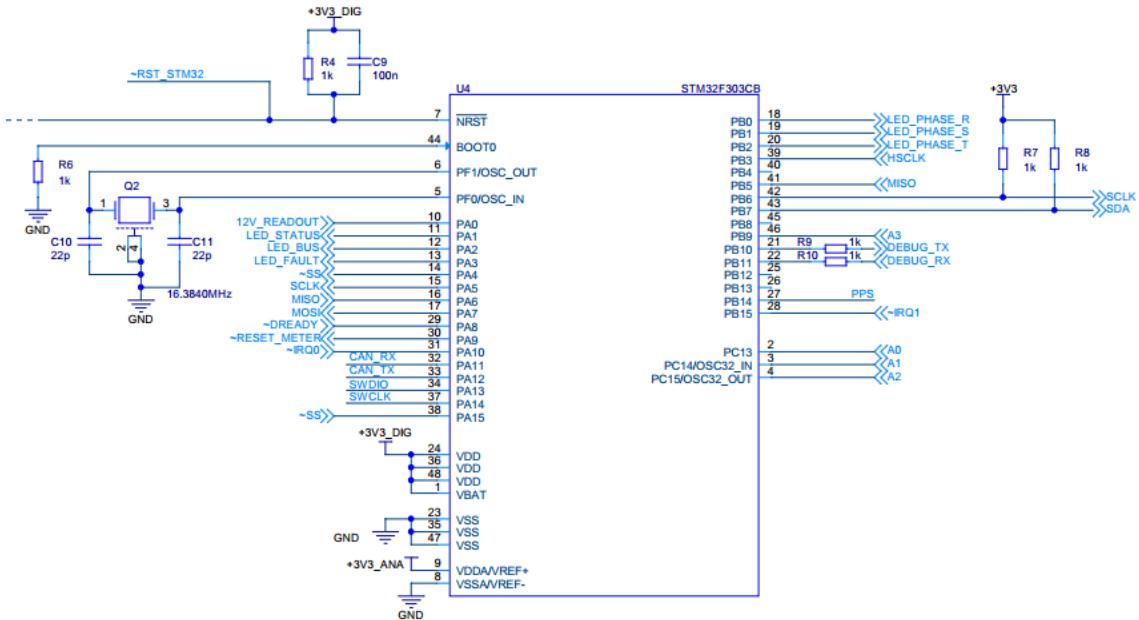
$$V_{RIPPLE(ESR)} = 0.75A * 0.010\Omega = 7.5mV$$

$$V_{RIPPLE(C)} = \frac{0.75A}{8 * 20\mu F * 500kHz} = 9.4mV$$

$$V_{RIPPLE} = 7.5mV + 9.4mV = 16.9mV$$

Ezt a maximális feszültséghullámosságot minden rendszerben lévő eszköz probléma nélkül el fogja viselni, így az értékválasztások megfelelőek.

#### 4.2.2. MCU és környezete

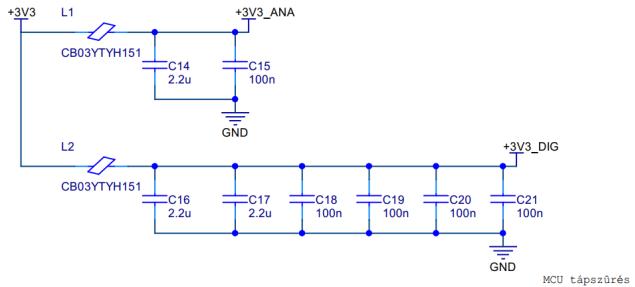


**4.2. ábra.** A mikrokontroller és közvetlen környezete

A mikrokontrollert külső kvarcról van járatva, hogy a nagysebességű CAN-hez megfelelő pontosságú órajel legyen a modulnak. Az MCU-tól az ADE7978 felé a hardver biztosít I2C és SPI interfészét is, azonban végül csak az SPI lett használva a nagyobb adatátviteli sebesség elérésének érdekében.

A processzor helyes és stabil működéséhez mindenkorábban jól megszűrt tápot kell alkalmaznunk, még ha ideális körülmények között nem is lenne szükség ilyen mértékű zajelnyomásra. A tényleges felhasználás során, illetve az EMC tesztek alkalmával jelentős zavarokkal terhelhetjük az áramkört, az ez elleni védelemek egy nagyon fontos pontja pedig a tápszűrés.

A megfelelő szűrés elérésének érdekében különböző értékű kondenzátorok lettek párhuzama-

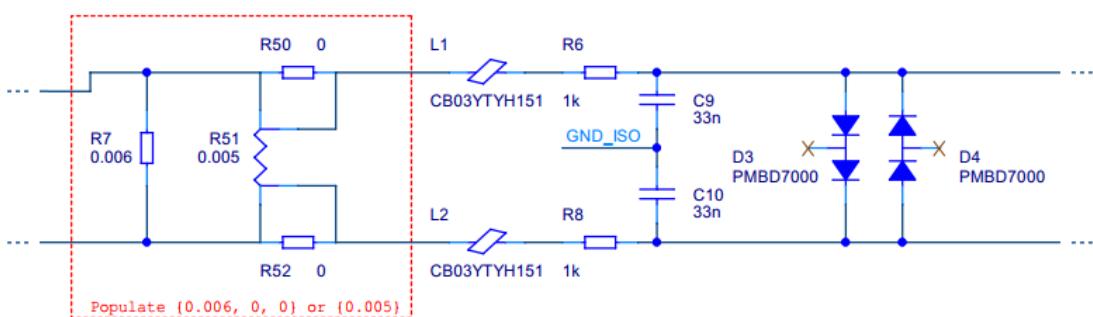


**4.3. ábra.** A mikrokontrollerhez tartozó tápszűrés

mosan elhelyezve, melyek így egy szélesebb frekvenciatartományon biztosítanak kisimpedanciás feszültségforrást, míg a digitális és analóg tápokhoz helyezett egy-egy soros ferrit a nagyfrekvenciás zavarokat szűrik a kontroller tápján befelé és kifelé egyaránt, így egy robosztus rendszer tápáramkörében elengedhetetlen alkatrész.

A kondenzátorok konkrét értékének megválasztása elsőkörben ökoliszabályokon alapul, az eszköz működési sebességéből lehet egy olyan frekvenciatartományt becsülni, ahol a digitális áramkörök belső, gyors kapcsolásaiból keletkező komponensek lesznek. A szűrőnek ezen a tartományon mindenkorban kapacitivan, alacsonyimpedanciásan kell viselkednie. A valós alkatrészek fizikai kialakításukból, illetve a köztük és az áramfelvétel helye közötti vezetékekésből származó induktivitás és ellenállás jellemzi, amik egy bizonyos frekvencia felett meggátolják a szűrést, induktív jellegűvé téve a kondenzátort. Ezeket a paraizta hatásokat minél kisebb tokozással, illetve a tápbemenetekhez való minél közelebbi elhelyezéssel lehet csökkenteni.

#### 4.2.3. Bemeneti áramkör - Áram bemenet



**4.4. ábra.** Az áramméréshez tartozó bemeneti áramkör

A CR-PM3 árammérő bemeneteit elsősorban árammérő transzformátorok fogadására kell felkészíteni, ugyanakkor szemelőtt kell tartani az esetleges tisztán (külső) söntös alkalmaságok lehetőségét.

Áramváltó transzformátoros megoldás esetén a kis értékű sönt használata miatt egy lebegő áramforrásként tekinthetünk a bemeneti jelforrásra, amely a mérősorton feszültséget ejt,

ezt pedig a szűrő- és védőáramkörökön keresztül az ADE7933 jelkondicionáló fokozatára, majd analóg digitális átalakítójára jut.

A söntök választásánál két, gyártás során eldönthető opció került kialakításra: Egy kissé precizitású, 1%-os  $6m\Omega$ -os két vezetékes ellenállás, mely olcsóbb, illetve egy 0.1%-os  $5m\Omega$ -os, négy vezetékes sönt, mely nagyobb költségű. A jövőben elkövethető, hogy ez az opcionális ültetés kikerül a termékből, azonban egy prototípus tervezésénél minél több lehetőséget érdemes biztosítania a tervezőnek, hogy abból a termékfejlesztés korai szakaszában tapasztalatot meríthessen.

A söntöket ferrit szűrők követik, melyek néhány 10kHz-es tartományig  $\Omega$ -os nagyságrend alatti impedanciát képviselnek, szűrő hatásukat a 100MHz, illetve afeletti tartományban fejtik ki.

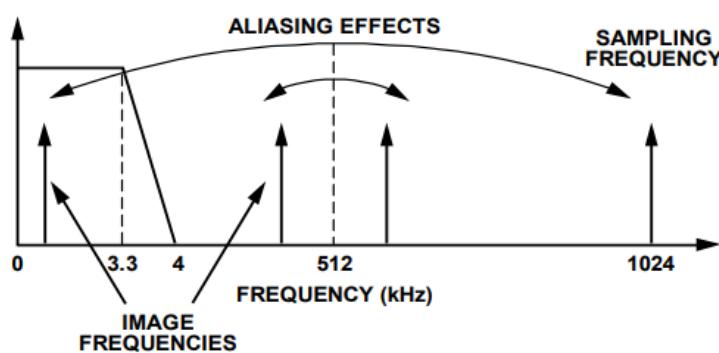
Az RC aluláteresztő tervezett töréspontja

$$\frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 1000 * 33 * 10^{-9}} = 4823Hz$$

ez pedig 10%-os kondenzátor tűréssel, és 1%-os ellenállás tűréssel számolva legrosszabb esetben 4337Hz-re csökken, amely még mindig jóval az ADE7933-ra specifikált 3.3kHz-es sávszélessége felett van. Mivel a mintavételei frekvenciája az ADC-nek 1.024MHz, így a hibát okozó, mintavételezésből keletkező tükrözések komponenseket keltő zavaró jelek szintén ezen frekvencia közelében lesznek. Ezeken a frekvenciákon az RC szűrő átviteli karakteristikája közelítőleg

$$|A_{RC}|_{f=f_{sampl.}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + (\omega_{sampl.}RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f_{sampl.}RC)^2}} = 0.00471 = -46.5dB$$

Ez pedig valószínűsíthetőleg megfelelő elnyomást fog biztosítani a normális működéshez.

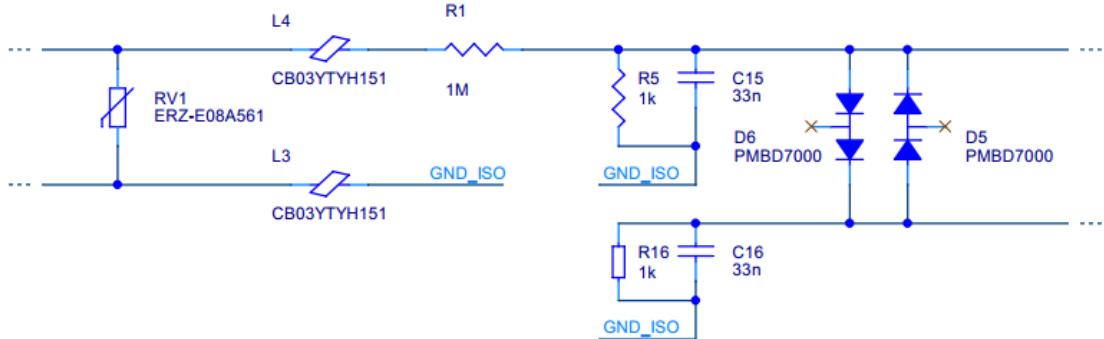


**4.5. ábra.** Átlapolódás jelensége az ADC bemenetén

A bemeneten található gyors diódák hatékony kétirányú ESD védelmet biztosítanak, illetve túláram esetén a keletkező hosszabb idejű feszültségtüskék levágását biztosítják. A szivárgási áramuk üzemszerű működés közben elhanyagolható. Típusukat tekintve gyors diódák, feléledési idejük  $t_{rr} \leq 4ns$ , ezek pedig a bemeneten található RC szűrőkkel megfelelő védelmet biztosítanak az esetleges sztatikus kisülések, rövid, kis energiájú feszültségtüskék

ellen.

#### 4.2.4. Bemeneti áramkör - Feszültség bemenet



**4.6. ábra.** A feszültségméréshez tartozó bemeneti áramkör

A feszültségmérő bemenetek kialakításukat tekintve naqyban hasonlítanak az áramméréshez használtakhoz.

Nagyfrekvenciás zavarok ellen ugyanolyan ferritek, valamint ugyanakkora töréspontú RC szűrők kaptak helyet a bemeneten, a túlfeszültségek korlátozásáról pedig itt is a diódás védő áramkör gondoskodik.

A hálózati feszültség mérésítartományra való leképezését egy egyszerű ellenállásosztó biztosítja, melyben 0.1%-os precizitású alkatrészeket használtam. Ez az ADE7933  $\pm 0.5V$ -os névleges bemenetitartományra kell leképezní a névleges 230V-os effektív hálózatfeszültséget, megfelelő tartalékkal, hogy esetleges túlfeszültségeket is tudjunk még vizsgálni. Az MSZ-1:1993 alapján, a 230V-os kisfeszültségű hálózaton a legnagyobb megengedett érték a 248V, így méretezzünk valamivel ezen érték felé, például 300V-ra.

$$V_{IN(ADE7933)} = V_{IN(CR-PM3)} * \frac{R_5}{R_5 + R_1}$$

Ebből egyszerű átrendezéssel megkaphatjuk az ellenállásosztó szükséges arányát:

$$\frac{R_5}{R_5 + R_1} = \frac{V_{IN(ADE7933)}}{V_{IN(CR-PM3)}} = \frac{\pm 0.5V}{\pm 300 * \sqrt{2}} \approx 0.0012$$

Az egyszerűség kedvéért, mivel az árambemeneteken  $1k\Omega$ ,  $33nF$ -os RC szűrőt használtunk, itt válasszuk  $R_5$  értékét ugyanúgy  $1k\Omega$ -ra. Így  $R_1$  értékére:

$$R_1 = \frac{R_5}{0.0012} - R_5 = \frac{1k\Omega}{0.0012} - 1k\Omega \approx 832k\Omega$$

Az ellenállás értéke mellett ebben a felhasználásban rendkívül fontos paraméter a feszültiségtűrés, hiszen erre az alkatrészre fog esni a bemenetre kapcsolt feszültség döntő része. Ehhez a számolt értékhez legközelebbi ami beszerezhető és megfelel a feszültségterhelésnek, az a Vishay TNPV e3 sorozatú, 1206-os tokozású,  $1M\Omega$ -os ellenállása. Az alkatrész

túlfeszültségtűrése kitűnő, rövid időtartamra ( $t \leq 1s$ ) paraméterromlás nélkül képes 2kV-ot elviselni. Ezzel az ellenállással a készülék bemeneti tartománya a következőképpen változik:

$$V_{IN(CR-PM3)} = \pm 0.5V * \frac{1k\Omega + 1M\Omega}{1k\Omega} = \pm 500.5V \approx 354V_{RMS}$$

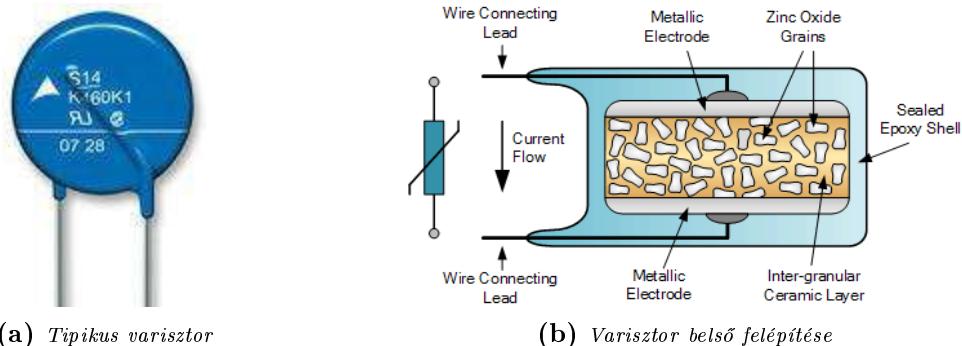
#### ESETLEG INNEN ÚJ SUBSECTION?

A feszültség bemenetnek az áramméréssel ellentétben nagy energiájú túlfeszültségeket is el kell viselnie, gondoljunk itt induktív kapcsolási jelenségekre a hálózaton, villámcsapások másodlagos hatásaira, vagy bármilyen egyéb, a készülék bemeneteire csatolódott zavaró jelre. Ezt a különbséget pedig a szabványok is figyelembe veszik, például a CR-PM3-ra vonatkozó IEC 62052-11:2003 termékszabvány azt írja elő, hogy az EMC immunitási vizsgálatok egy részében csak a feszültség bemeneteket terheli, az árambemeneteket üresen kell hagyni. A feszültségbemeneteket érő zavarok ellen túlfeszültség védelmet kell implementálni a biztonságos, stabil működés érdekében. Ezekre a leggyakrabban alkalmazott megoldások [23]:

1. *Szikraköz* A túlfeszültség védelmek közül ez a legegyszerűbb, itt az átütés jelenséget használjuk fel védelmi célokra, amelynek kritikus feszültsége viszont a környezeti körülményektől erősen függ. A szikraközt mindenkor mindenkorlátozó eszközzel (Kismegszakító, olvadóbiztosító [24]) együtt kell alkalmazni, anélkül még nagyon kis áramok esetén is megmaradhat az ív, az pedig tűzveszélyes.
2. *Nemesgáz töltésű szikraköz (GDT)* A szikraközhöz hasonló, azonban itt egy hermetikusan lezárt eszközben alakul ki a kontrollált ív, amely biztonságosabb működést eredményez.
3. *Fémoxid varisztor* Egy nemlineáris ellenállásként viselkedő eszköz, mely a szikraköznel ellentétben a túlfeszültség megszűnésekor, amennyiben a varisztor nem hibásodott meg, normál működésbe tér vissza, csak szivárgási árama lesz.
4. *Transient voltage suppressor* Hasonló karakteristikájú egy Zéner diódához, gyors nyitási idővel, azonban kisebb szivárgási árammal, nagyobb impulzus teljesítménnyel. Hosszabb idejű túlfeszültség korlátozására alkalmatlan.
5. *Tirisztoros vágó áramkör* Egy nagy teljesítmény elvezetésére képes megoldás, azonban itt gondoskodni kell a zárlati áram megszakításáról. A túlfeszültség és áramkorlátozás megszüntetése után az áramkör alapállapotba kerül. Hátránya, hogy rövid idejű feszültségtűske esetén feleslegesen korlátozhatja a kimenetén a feszültséget.

### 4.3. NYÁK terv

A nyomtatott áramköri terveket Allegro PCB Designer-ben valósítottam meg, költséghatékonyági szempontból 2 rétegen. Fontos feladat a tervek készítésekor figyelembe venni



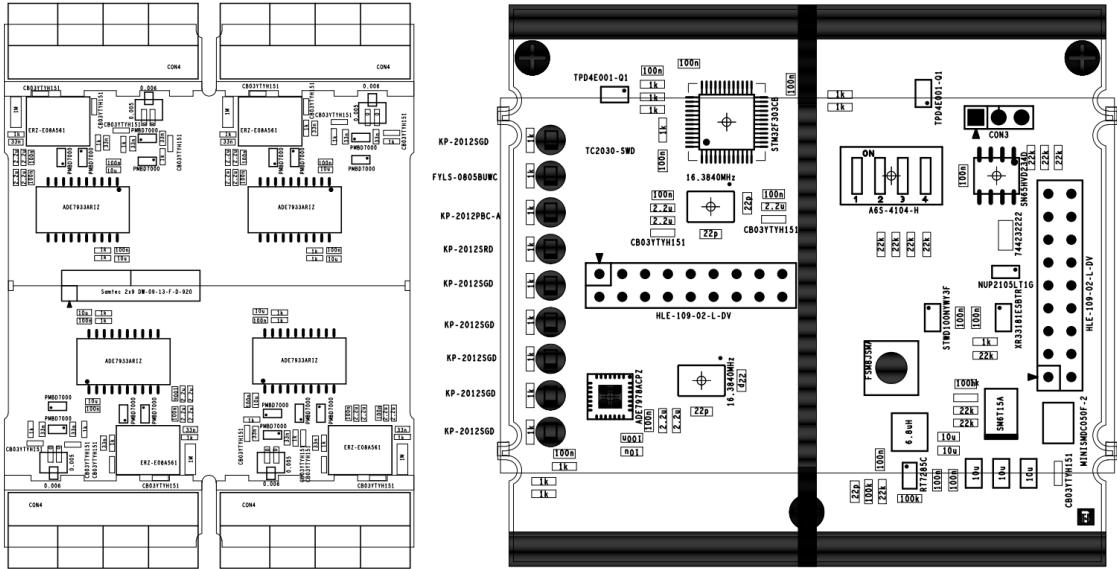
**4.7. ábra.** A varisztor [25]

a gyárthatósági szempontokat, hiszen az alkatrész és NYÁK költségek mellett a termék önköltségéhez ugyanúgy hozzájárul a gyártás ára.

Első lépésként a készülékház gyártója által szolgáltatott 3D modellból indultam ki, amelyben a különböző szintekhez tartozó sablonok találhatók. Ezekből .dxf kiterjesztésű, 2 dimenziós rajzokat készítettem, majd ezt importáltam be a tervező programba az "Outline" rétegre. Ezt követően elhelyeztem a csatlakozókat, mechanikai furatokat, illetve bejelöltetem azokat a területeket a NYÁK-on, ahol a készülékház miatt valamilyen megkötés van, például alsó/felső oldalra nem helyezhető bizonyos értéknél magasabb alkatrész. Ezután felvettek a kényszereket, majd elhelyeztem a LED-eket, címbeállító kapcsolót, valamint a reset nyomógombot, mivel ezek pozíciója határozza meg a felhasználói felületet, amennyire csak lehet, ergonomikussá kell tenni azt. Csak ezek után következett az összes többi alkatrész, ügyelve a szűrő kondenzátorok, kvarrok helyzetére, a táp vonalak huzalozásának integritására. A CR-PM3C-n via stiching-et alkalmaztam, ami segítségével szabályos rácsban viákat helyeztem el a GND rétegre, ezzel javítva a földelés minőségét. A via stiching jelentősen tudja javítani az immunitást, illetve csökkenteni az emissziót több rétegű NYÁK-ok esetén. A terveket sikeresen elvártam a termék szerelésre előkészíteni, ezzel csökkentve a modul gyártási költségét.

#### 4.4. Szabványosság

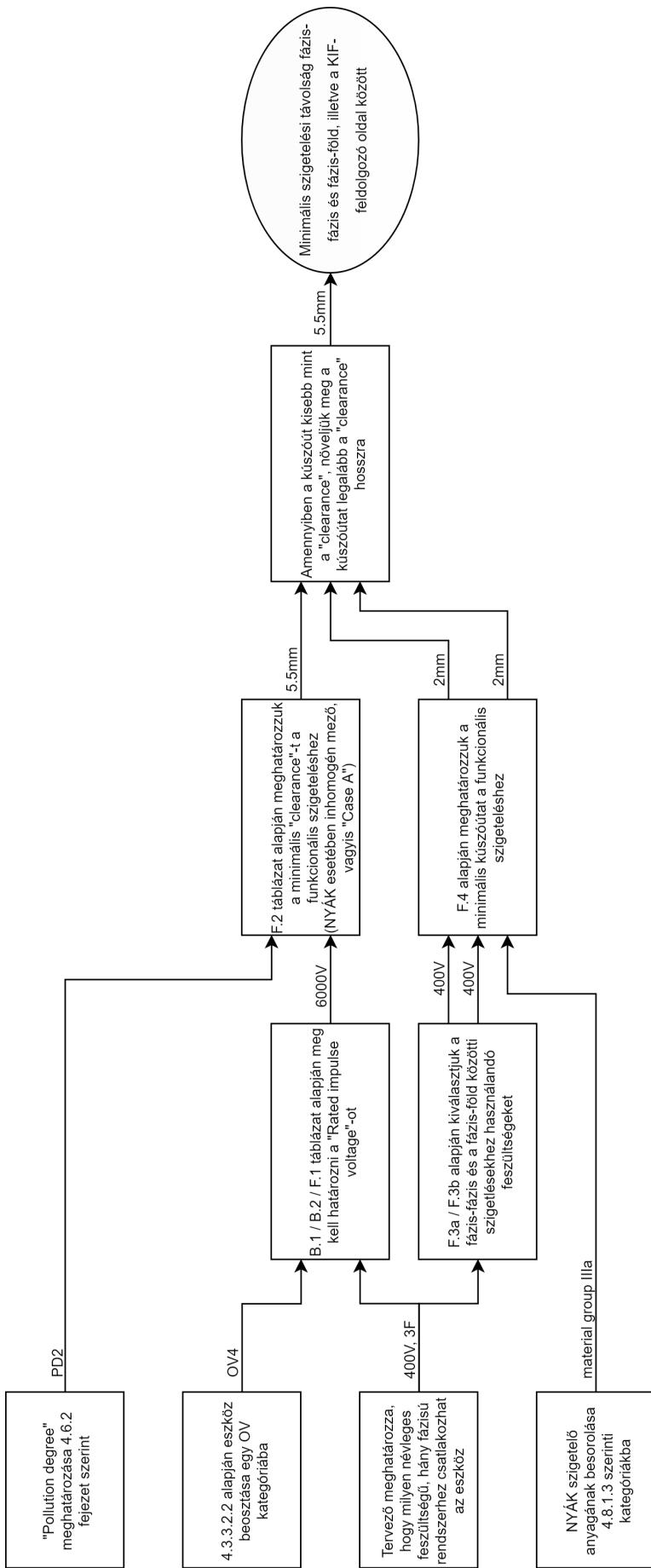
Egy eladásra szánt terméknél elengedhetetlen a szabványoknak való megfelelés, azonban ezen szabványok megismerése és betartása jelentős feladat a projekt fejlesztése során. Egy-egy ilyen dokumentum értelmezéséhez jelentős villamosmérnöki háttértudás és utánajárás szükséges, ugyanakkor rendkívül tanulságosak, hiszen ezek egy jelentős része kifejezetten a villamosmérnöki gyakorlat tapasztalatai alapján készültek el. Már önmagában az is kihívás lehet, hogy egy adott terméknek mely szabványoknak kell megfelelnie, ugyanis bizonyos terméket funkciót tekintve akár több szabvány is érinthet, néhányra azonban csak általános szabványok vonatkoznak.



**4.8. ábra.** CR-PM3A és CR-PM3C

#### 4.4.1. Szigeteléskoordináció

Az egyik betartandó szabvány az IEC 60664-1, "Kifeszültségű rendszerek villamos szerkezeteinek szigeteléskoordinációja". Ez a dokumentum írja le az eljárást, amely alapján meg kell határozni a szigeteléshez szükséges lékgözöket, kúszótakat. A dokumentum értelmezése a termékek és felhasználási helyének sokfélesége miatt időintenzív, éppen ezért egy segítő folyamatábrát készítettem, amivel egyszerűbb a szükséges minimális távolságok meghatározása.



**4.9. ábra.** Szigeteléskoordináció IEC 60664 alapján

#### 4.4.2. EMC

Az elektromágneses kompatibilitás (EMC) egy termék megfelelő működését jelenti a (villamos) környezetében, anélkül, hogy az más eszközben elfogadhatatlan (villamos) zavarokat keltene. Ebből következik a két komponense:

1. *Immunitás*, amely a zavartűrő képessége a vizsgált eszköznek.
2. *Emisszió*, ami pedig a zavarkibocsátását írja le.

A tervező mérnöknek a kapcsolási rajz készítése, alkatrészek kiválasztása, NYÁK rétegszám meghatározásánál és rajzolat kialakításánál számításba kell vennie, hogy az immunitásnak jobbnak kell lennie, mint a szabványok által előírt minimális, az emissziónak pedig alacsonyabbnak, mint a megadott maximális határérték. Sajnos, a villamosmérnöki szakma egyik legkevsebbé egzakt tudományterülete az elektromágneses kompatibilitás, gyakran "fekete mágiának" tartják, mivel itt már a koncentrált paraméteres modell nem minden állja meg a helyét, illetve a diszkrét kondenzátorok induktív karakterisztikát is mutathatnak, a tekercsek pedig kapacitívat, de egy széles spektrumú zavaró jelnél, mint például egy ESD esemény, a frekvencia tartomány különböző részein más-más jelleget mutathatnak az alkatrészek. Tovább nehezíti a terület problémáinak tiszta megértését a hiba lokalizálása, mivel egy komplex áramkör esetén egy néhány pF-os mérőfej is jelentősen befolyásolja a mérendő rendszert, általában csak a termék teszt alatti meghibásodásából következtethetünk a hibaforrásra. Az áramkör készítője lényegében csak törekedni tud a megfelelésre, ellenőrizni azt csak utólagos mérésekkel lehet, illetve amennyiben az áramkör egyik verziója elbukik az EMC teszteken, akkor az alkatrész értékek változtatásában lehet bizakodni.

EMC követelmények számos szabványban szerepelnek, ezek struktúrája a következő [4]:

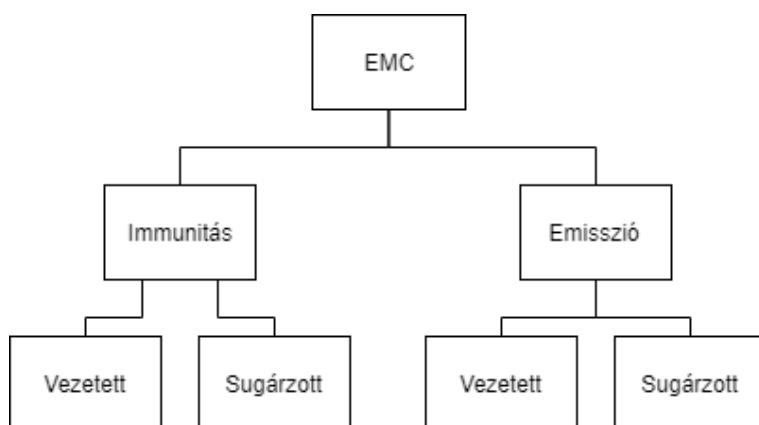
1. *Alapszabványok (Basic standards)*: Ezen szabványok mutatják be a vizsgált jelenségeket, leírják a teszteszközök tulajdonságait, valamint bemutatják a szükséges mérések helyes elvégzésének lépéseit.
2. *Általános szabványok (Generic standards)*: Bizonyos felhasználási területekre írnak elő szükséges teljesítendő teszt szinteket, utalva az alapszabványokban leírt mérésekre. Az ebbe a kategóriába tarozó előírásokat abban az esetben kell alkalmazni, amennyiben nincs termékszabvány.
3. *Termékszabványok (Product standards)*: A legspecifikusabb szabványok, melyek szigorú követelményeket támasztanak elő egy konkrét termékkel kapcsolatban. Ezekben a dokumentumokban különleges teszteket is előírhatnak, melyek sem az alapszabványokban, sem az általános szabványokban nem szerepeltek.

Egy termék tesztelése esetén a fenti listán alulról felfelé haladva kell meghatározni a legszigorúbb szinteket. Egy háztartási vízforraló példáján keresztül nézzük a lépéseket:

- Alapszabvány:* IEC 61000-4-x sorozat, tartalmazza a különböző EMC jelenségek leírását, méréseket.
- Általános szabvány:* IEC 61000-6-1, lakossági felhasználású eszközök teszt szintjei.
- Termékszabvány:* EN 55014-1, háztartási eszközök követelményei.

A fenti listából, mivel létezik termékszabvány, annak az értékeit vesszük, és az alapszabvány tesztejeit hajtjuk végre.

Egy elektronikus eszköz tervezése során nem elég a mérnököknek laborkörülmények között működő terméket készíteni, gondolni kell a későbbi tényleges használat során felmerülő zavaró hatásokra. Ennek a figyelmen kívül hagyása miatt találkozhatunk például olyan olcsóbb USB-s egerekkel, amelyek elveszítik a kapcsolatot a számítógéppel egy másik eszköz csatlakoztatásakor.



**4.10. ábra.** EMC vizsgálatok osztályzása

## Immunitás

A zavarérzékenység vizsgálatához különböző zavaró jeleket viszünk be a rendszerbe, melyek valamilyen ténylegesen előforduló jelenséget hivatottak szimulálni.

- Burst:* Ez a zavar egy kontaktuson kialakult, prelegő ív sorozat hatását utánozza. A hatását csökkenteni megfelelő földeléssel, közösmódusú fojtó tekercsekkel lehet.
- Surge:* Induktív terhelések kapcsolása, biztosítékok kiégése, illetve villámcsapások másodlagos hatásaként jönnek létre hasonló, nagy energiájú jelalakok. Különböző túlfeszültség vezetők alkalmazásával, például varisztorokkal, TVS diódákkal lehet megvédeni a készüléket.
- ESD:* A leggyakrabban előforduló, hétköznapok során is megtapasztalt jelenség, mely gyakran a legnagyobb fejfájást okozza a fejlesztőnek, mivel nagyon rövidejű a lefutása, széles a spektruma. Megfelelő földeléssel, kondenzátorokkal, ellenállásokkal, ferritekkel és TVS diódákkal növelhető az ezek elleni immunitás.

4. *Vezetett RF*: Ez a zavar közeli kábelek induktív és kapacitív egymásrahatását utánozza. Az AM modulált zavarjelet gyakran demodulálják a félvezetők, ami hibás működéshez vezethet. A különböző csatlakozókon bejövő jelek megfelelő szűrésével, árnyékolt kábelek használatával lehet védekezni ellene.

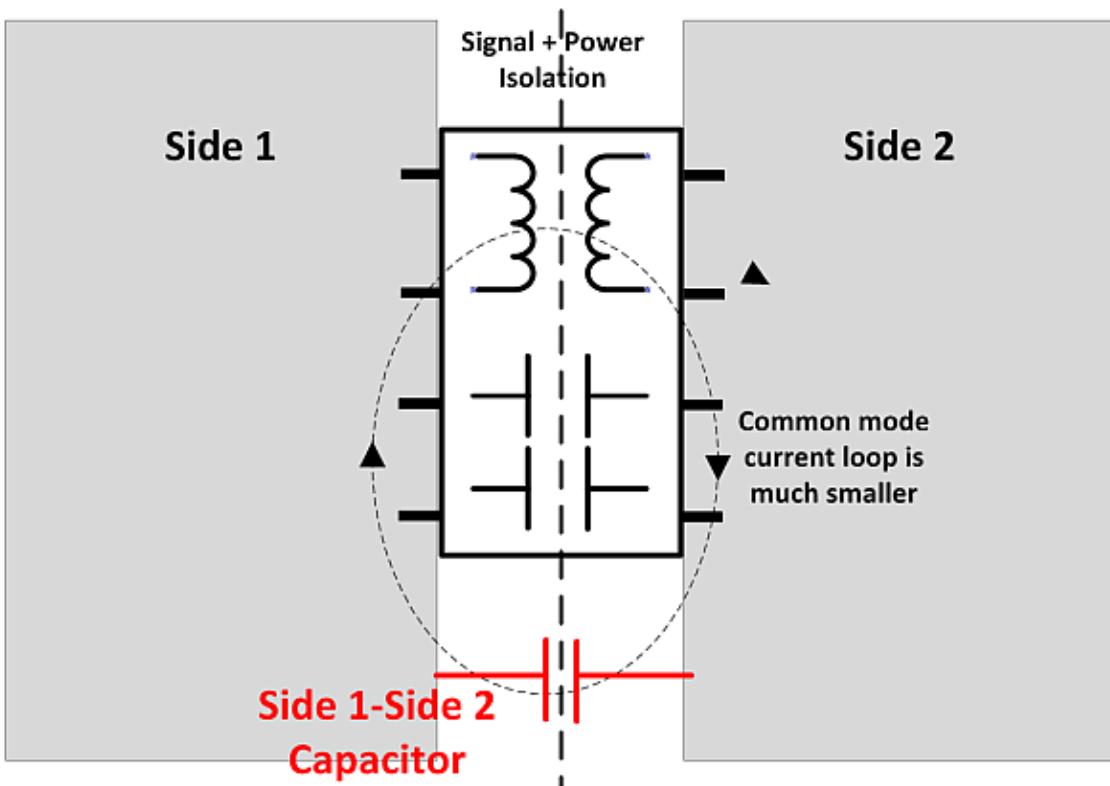
## Emisszió

A zavarkibcsojtás mérése során elsősorban a vezetett és sugárzott zavarokat különböztetjük meg.

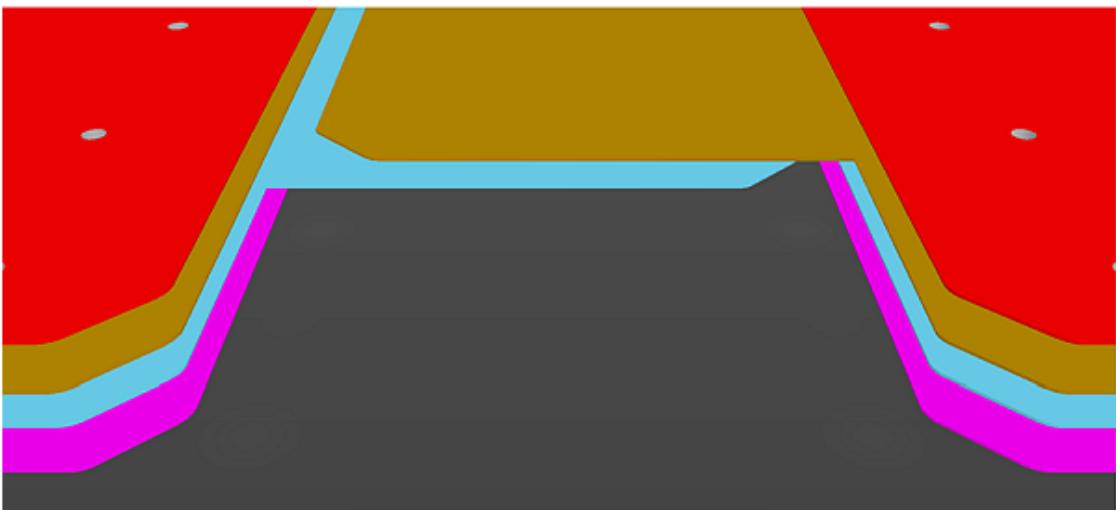
Sajnos a diplomaterv írása során nem volt lehetőség emisszió vizsgálatok elvégzésére egy EMC laboratóriumban, így erről nincsenek közölhető adatok. Valószínűsíthetőleg a vezetett zavarkibocsájtás nem haladja meg a határértéket, mivel a CR-PM3-nek csak bemeneti vannak, ezek pedig RC tagokkal csatlakoznak az analóg-digitális konverterekhez.

A sugárzott zavarkibocsájtást nagy valószínűséggel a 180MHz-en működő iCoupler alapú integrált táp leválasztók dominálják az ADE7933-akban, ezek a kritikus alkatrészek. A Prolan Zrt.-n belül több termékbен is helyet kapott olyan alkatrész, amely ezt a technológiát használja, ezekkel pedig mindig volt valamilyen emissziós gond. Ahhoz, hogy egy apró tokozású, néhány mm-es alkatrészen belül tápot tudjanak leválasztani, a légmagos transzformátor nagy, több 10, de akár 100MHz-es frekvencián kell járatni. A probléma a transzformátor két oldala közötti kapacitásból következik, mivel ekkora frekvenciákon a primer oldal kapcsolási tranzisztori a szekunder oldalon közösmódúsú zavarokat tud kelteni. Ezek a zavarok viszont csak a két oldal közötti, NYÁK szintű kapacitásokon keresztül tudnak záródni, ami így viszont jelentős méretű, nagyfrekvenciás áramhurkok létrejöttéhez vezethet.

Az innen származó sugárzás csökkentésére az egymástól elszigetelt födeket érdemes egy nagyfeszültségű, kis értékű, néhány száz pF-os Y kondenzátorral összekötni, amely megfelelő kapacitás érték választása esetén a zavart gyakorlatilag kisöntöli. Az Y osztályú kodenzátorok megnövelt elektromos és mechanikai megbízhatósággal bírnak, amelyet kötelező tesztelni, továbbá számos szabványnak meg kell felelniük, hiszen ezek meghibásodása akár életvédelmi kockázattal is járhat. Az Y kondenzátorokat további alkategóriákba sorolják a névleges üzemifeszültségük, illetve az ehhez tartozó impulzus feszültség alapján. Y kondenzátort kell alkalmazni, amennyiben az alkatrészt L-PE, vagy N-PE közé helyezzük el, így a mi alkalmazásunkban, földelt C-RTU rendszer esetén N-PE közé kerül. A tényleges megvalósítás esetén szembekerülhetünk azzal a problémával, hogy a választott nagyfeszültségű kondenzátor soros induktivitása dominál a szükséges frekvenciákon, ezzel jelentősen csökkentve a zavarcsökkentő hatását. Ezt elkerülendő létrehozhatjuk a szükséges kapacitást a NYÁK-on is, a két oldal egymásra lapolásával. Ennél a módszernél figyelembe kell venni az FR4-es NYÁK dielektromos szilárdságát, illetve a szabványok által előírt szükséges minimális szigetelési távolságokat. [18] [20]



4.11. ábra. Emisszió csökkentése integrált izolált táp esetén [20]



4.12. ábra. Emisszió csökkentésének tényleges megvalósítása [19]

Az Analog Devices egy további megoldást is közöl, amely abban az esetben alkalmazandó, ha a szigetelési feltételek miatt nem tudjuk kialakítani a két oldal közötti kapacitást: használunk földelt fém burkolatot. [18]

#### **4.4.3. EMC tesztek**

Mivel a CR-PM3 a diplomaterv írásának idején még csak prototípus fázisban volt, nem vizsgáltattuk be azt külön hitelesített laborban, ahol az eszközpark bérlese jelentős költségeket jelent, ehelyett a Prolan Zrt. saját laboratóriumában végeztünk el bizonyos immunitás teszteket. Az itt rendelkezésre álló speciális műszerek:

1. *EM Test DITO*: IEC 61000-4-2-ben leírt tesztnek megfelelő kézi elketrosztatikus kisülés generátor
2. *EM Test UCS 500 M*: Burst, surge, tápkimaradás szimulátor.
3. *PMM 3000*: 10kHz-1GHz átfogású jelgenerátor
4. *PMM 6000N*: 9kHz-230MHz átfogású erősítő

A CR-PM3 teszteji során az IEC 62052-11:2003 termékszabványban találhatóak a szükséges mérési szintek, illetve speciális mérési előírások. Az szabvány által elvárt értékek a 4.2-es táblázatban láthatók.

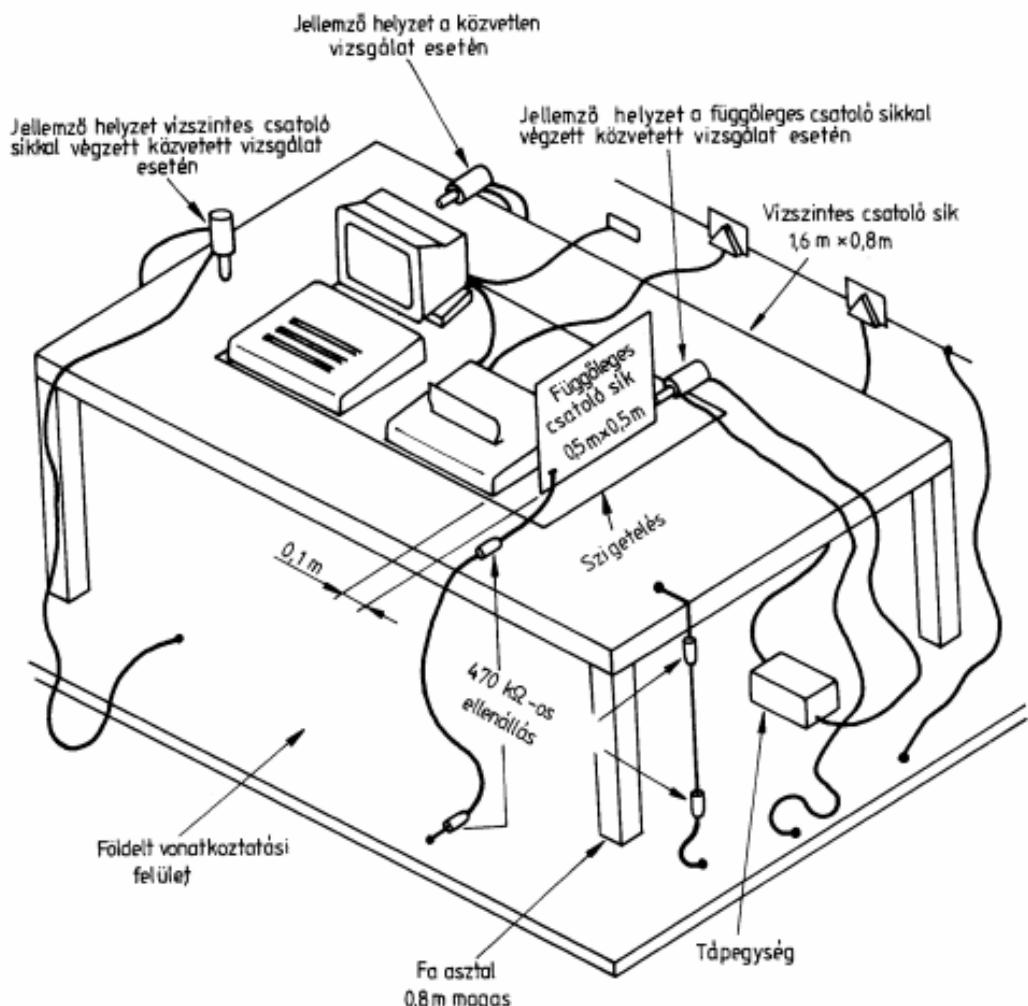
| Teszt                    | Szint                              |
|--------------------------|------------------------------------|
| Elektrosztatikus kisülés | 8kV érintési, 15kV átütési         |
| Burst                    | 4kV                                |
| Surge                    | 4kV, 2Ω-os generátor impedanciával |
| Vezetett RF              | 10V, 150kHz-től 80MHz-ig           |

**4.2. táblázat.** IEC 62052-11:2003 által támásztott EMC immunitási követelmények

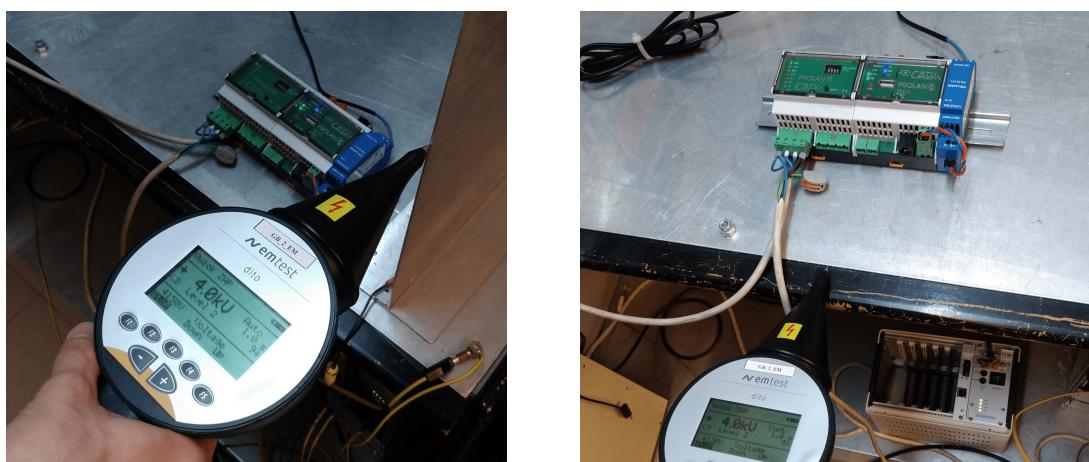
#### **ESD (IEC 61000-4-2)**

Mivel a CR-PM3 semmilyen vezető felülete nem érinthető a felhasználó által, így csak átütési kisülést (air discharge) kell vizsgálni az érinthető, szigetelő felületek határain, például LED-eknél, gomboknál, kapcsolóknál, illetve közvetett eseteket kell még nézni, amikor egy horizontális és vertikális csatolósíkkal juttatjuk be a zavarokat a rendszerbe érintkezési kisüléssel (contact discharge).

Erre a tesztre az IEC 62052-11:2003 termékszabványban előírt feszültség 8kV, amit az STM32-es processzor hiba nélkül kibírt mind a két csatolási síkkal, azonban az ADE7978 +6kV-nál és -3kV-nál is újraindult horizontális csatolósíknál. A termékszabványban szereplő kritérium ugyan elfogadhatónak tartja az átmeneti funkcióvesztést, ez mégis a termék robosztusságát, illetve annak hiányát jelzi. Miután több alkatrész érték megváltoztatása sem hozott lényegi javulást, arra a következtetésre jutottunk több kollégámmal, hogy az áramkört mindenkorral legalább 4 rétegű NYÁK-ra kell tervezni a javított zavarvédelem érdekében.



**4.13. ábra.** *ESD mérési összeállítás*

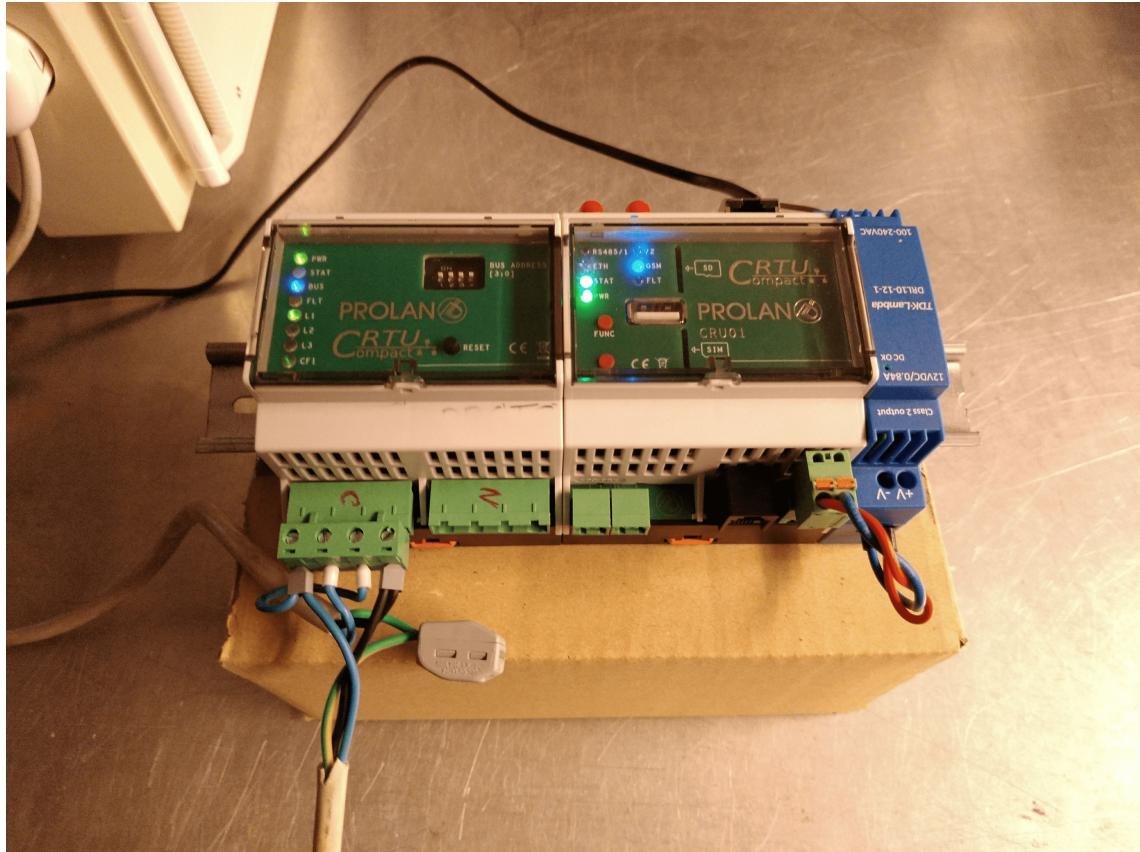


**4.14. ábra.** *ESD teszt csatoló síkokkal*

#### Burst (IEC 61000-4-4)

A méréshez a közvetlen söntös elrendezést alkalmaztuk, mivel így valószínűleg nagyobb zavar jut a mérőhöz, mint egy áramváltó transzformátoron kereszttüli bekötés esetén. A

terhelés egy elektromos fűtőtest volt, amivel az áramcsatornán nagyjából a mérési tartomány közepére jutó terhelés alakult ki.



**4.15. ábra.** *Burst és surge teszt mérési összeállítása*

A mérés során nem történt funkcióvesztés, a webes felületen keresztül folyamatosan nyomon tudtuk követni a vizsgált értékeket a webes felületen keresztül.

### **Surge (IEC 61000-4-5)**

A mérési elrendezés nem változott a burst vizsgálathoz képest, minden összeállítás beállításait kellett módosítani.

A méréshez a szabvány 1/min minimális frekvenciát ír elő, mivel a lehetséges védelemek (pl. varisztor) tulajdonságai melegedés hatására megváltozhattak. Mi a házi laboratóriumban 15 másodperces gyakorisággal kapcsoltuk a zavaró jelet a készülékre.

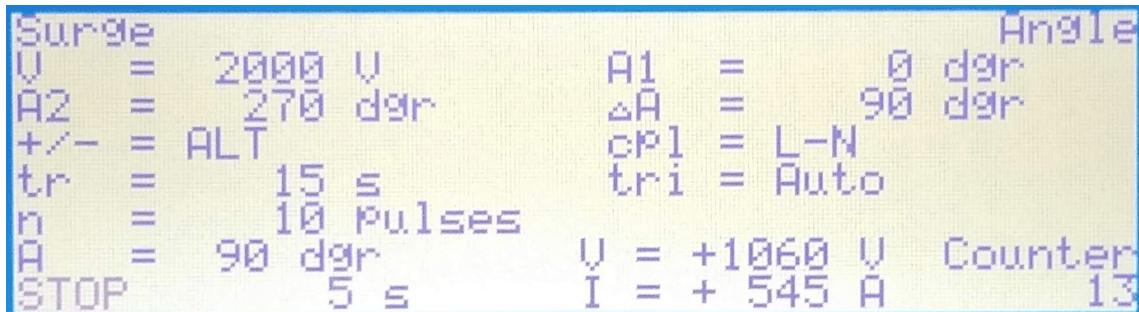
Ezen a teszten sem történt funkcióvesztés, az értékek a webes felületen folyamatosan frissültek.

### **Vezetett RF (IEC-61000-4-6)**

A rádiófrekvenciás terek által keltett vezetett zavarok vizsgálata során nem tapasztaltunk hibás működést. A zavaró jel 150kHz-től 80MHz-ig párosította végig a frekvenciatartományt.



**4.16. ábra.** Sztimulátor beállításai burst teszthez

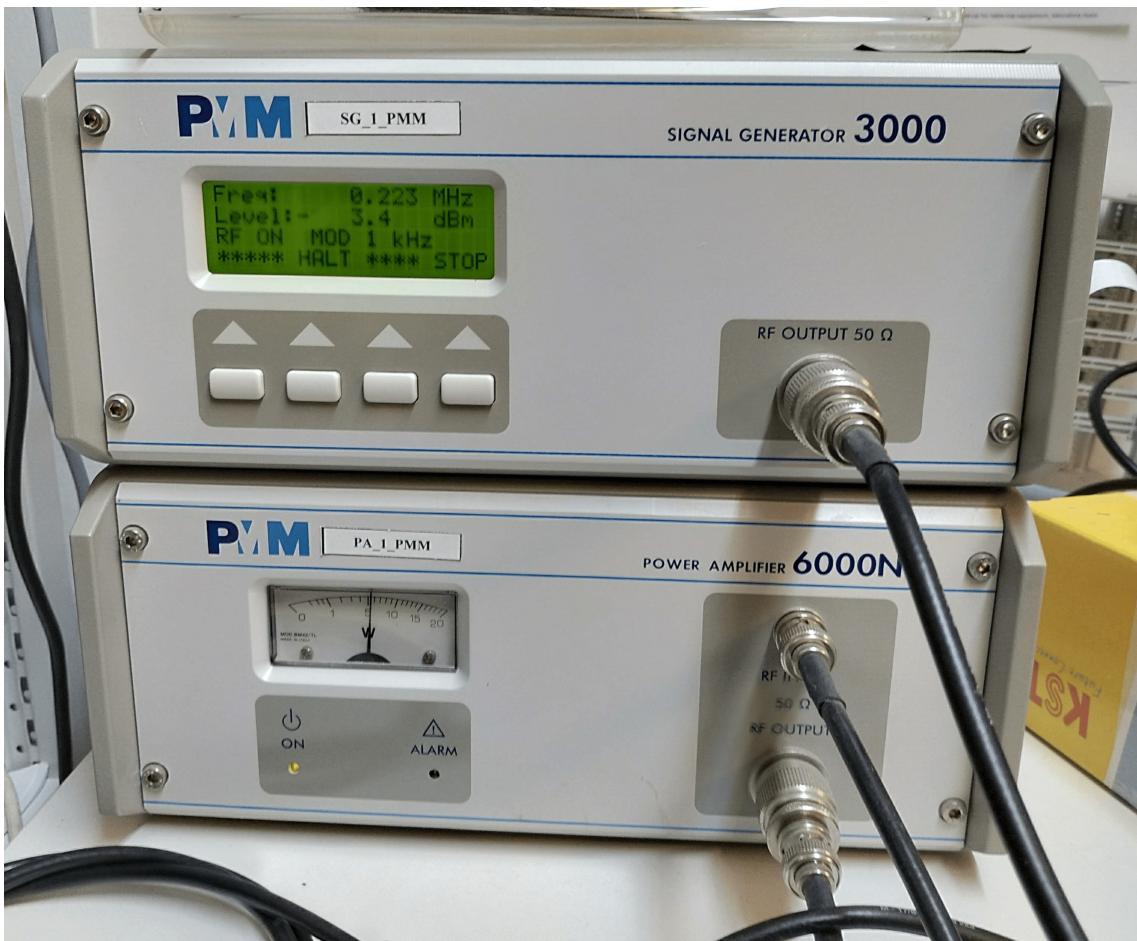


**4.17. ábra.** Sztimulátor beállításai surge teszthez

#### 4.4.4. Javítási tervezek

Sajnos a diplomaterv leadásáig nem volt már időm újratervezni a készüléket, azonban a következő módosításokat kellene végrehajtani a következő prototípus legyártása előtt:

- Rétegszám növelése:* Kétségkívül a legfontosabb módosítás legalább két további réteg felvétele, amelyek egybefüggő földkitöltést, illetve táp szigeteket tartalmaznak. Ezek a visszaáramok szempontjából alacsony impedanciás utat biztosítanak, táp szempontjából pedig egy nagyon alacsony impedanciájú, néhány 100pF-os kondenzátort jelentenek, amely nagyobb frekvenciákon (például ESD által keltett tranziensek spektrumának egy jelentős része) kiemelten fontos. Ezek mellett természetesen árnyékolást



**4.18. ábra.** Vezetett RF zavarok mérési összeállítása

is biztosítanak a kitöltött rétegek.

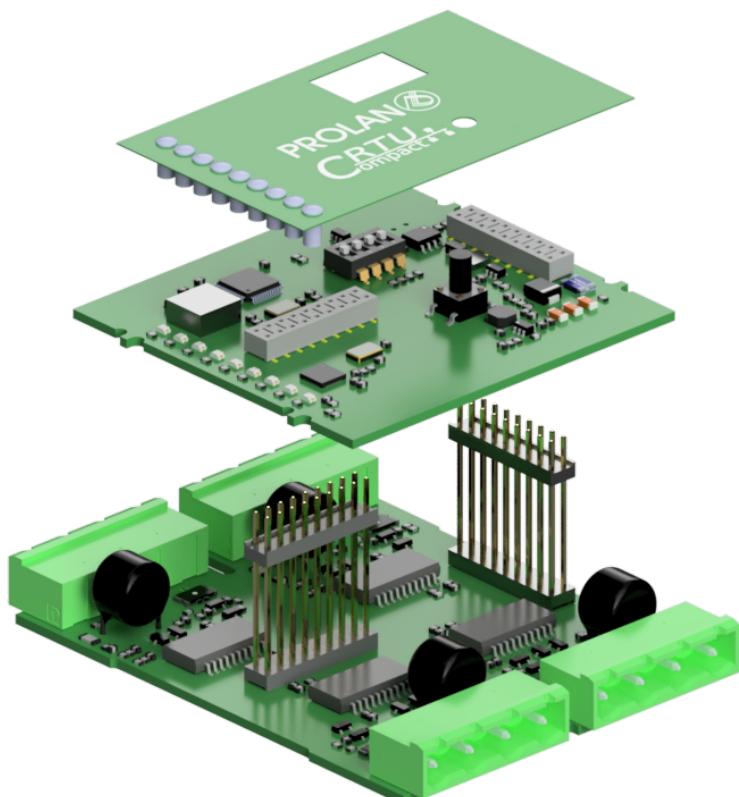
2. *ADE7978 áthelyezése:* Jelenleg a CR-PM3A és CR-PM3C közötti csatlakozón keresztül van vezetve az ADE7978 és a négy ADE7933 összes kommunikációs vonala. Mivel egy-egy tűsor középpontja egymástól 2.54mm-re helyezkedik el egymástól, ezért ott nem elhanyagolható méretű hurkok vannak, amely zavartűrés és kibocsájtás szempontjából sem szerencsések. Ezt csökkenteni úgy lehetne, hogy a DSP-t áthelyezzük az alsó NYÁK-ra, így az ADE7978 és mikrokontroller közötti SPI, reset, interrupt és táp vonalakat kell csak átvinni.
3. *SPI vonalak lezárása:* A különböző vonalak impedancia illesztésének elhanyagolása okozhat EMC problémákat, akár emisszió, akár immunitás tekintetében, mivel normál működés közben reflexiók alakulnak ki, amelyek hosszú vonalakon a zavar-kibocsájtáshoz járulhatnak hozzá. Amennyiben a zavaró jeleket kívülről csatoljuk a vonalra, azok szintén tudnak reflektálódni az illesztetlen lezárásokon (pl. nagy impedanciás digitális bemenetek) így azok zavaró hatása hosszabb ideig áll fenn. Ezekre a problémákra megoldásként a leggyakrabban soros lezárást alkalmazunk a meghajtó oldalon, amennyiben ez nem bizonyul elégnek, párhuzamos RC lezárást a fogadónál.
4. *NYÁK kapacitás kialakítása:* A táp és a föld közötti kapacitáson túl, egy zajvédelmi

kondenzátor is kialakításra kerülhet több rétegű konstrukciónál, amely az ADE7933-as IC-k alatt, az izolált oldalak és a rendszer földje közé kerülnek. Ezt a kapacitást az angol terminológia "stitching capacitor"-nak nevezi, szerepe pedig, hogy a leválasztás során keletkezett zavarokat csökkentse.

#### 4.5. Mechanika

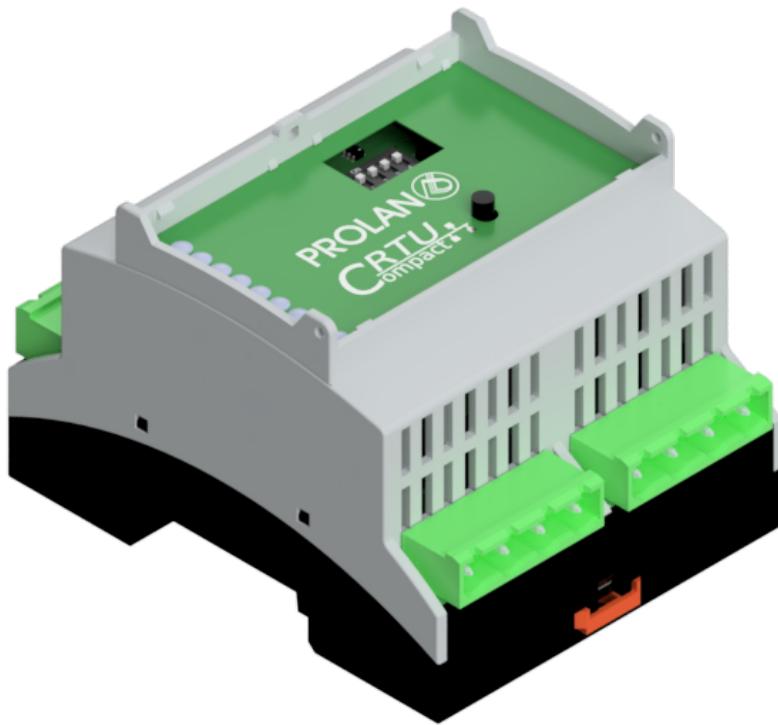
A CR-PM3 háromfázisú teljesítménymérő modul három nyomtatott áramköri lapból épül fel, ezek rendre:

1. *CR-PM3A*: A "front-end"-et valósítja meg, itt kapott helyet a 4 darab ADE7933 izolált mérő IC, az ezekhez kapcsolódó elektronika, valamint a KIF csatlakozók.
2. *CR-PM3C*: A mikrokontroller, illetve az ADE7978 égetett kódú DSP helyezkedik el ezen a szinten.
3. *CR-PM3P*: Elektronikai funkciót nem lát el, csupán a termék előlapja.



**4.19. ábra.** *CR-PM3 összeállítása*

A készüléken 4 csatlakozó található, ezek a 3 fázis, valamint a nulla vezetőhöz tartozó jelek csatlakoztatásáért felelősek.



**4.20. ábra.** CR-PM3 a készülékházban

A két elektronikát tartalmazó emelet közötti kapcsolatot a Samtec által gyártott speciális, DW családba tartozó tűsorával, és HLE családba tartozó hüvelyisorával valósítottam meg. A DW tűsorok a szokványos társaiktól eltérően egy további műanyag távtartóval rendelkeznek, amely magasságát 5mil felbontással lehet megválasztani rendelés során. Ezzel a távtartóval egyszerűen be lehet állítani a két NYÁK távolságát, az összeszerelést jelentősen egyszerűsíti. A HLE hüvelyisor pedig egy "Pass-through" típusú csatlakozó, vagyis akár alulról, akár felülről is képes fogadni az ellenpárját. Ez utóbbi tulajdonságát kihasználva tudtam a CR-PM3C-t egyoldalas szerelésűre kialakítani, mivel a NYÁK-on a csatlakozó felül helyezkedett el, alatta pedig fémezetlen furatok lettek kialakítva, így alulról akadálymentesen tudott a tűsor kontaktus kialakítani.

Az előlapon a C-RTU család minden tagján kötelező bizonyos állapotokat LED-del megjeleníteni. A tervezés fázisában a tényleges megoldásra nem volt teljes előírás, ezért a modulon egy addig nem használt megvalósítást próbálhattam ki. SMD LED-eket helyeztem el a CR-PM3C-n, majd a CR-PM3P előlapjára bepréselhető Bivar PLP2-215 polikarbonátból készült, 3mm-es fényvezetőit terveztem. Ezzel a megoldással a furatszerelt LED-ek beültetését váltottam ki, amely során nehézkes az alkatrész magasságának a pontos beállítása, ellenben egy fényvezető bepréselésének eredménye kellően konzisztens eredményt tud adni. A polikarbonátból készült átlátszó fényvezetők a különböző törésmutatójú közegek határán fellépő fényvisszaverődés jelenségét használják ki, az SMD LED-ek fényét az előlapig vezeti, akár több tíz mm-en keresztül.

## 5. fejezet

# Szoftveres komponensek

### 5.1. Mikrokontroller

A C-RTU kiegészítő moduljaiban leggyakrabban az STM32F303 mikrokontrollert használjuk, mivel ez a processzor már kellően erős az összes eddig felmerült feladat ellátására, ezek mellett viszont nagyobb darabszámnál viszonylag alacsony költségű.

A maximális órajel 72MHz, ehhez 90 DMIPS számítási teljesítmény társul. Tartalmaz ezek mellett FPU-t, ami az analóg alkalmazások esetén rendkívül hasznos. Perifériák tekintetében is jól felszerelt a kontroller, rengeteg timer, ADC csatorna és kommunikációs interfész áll a fejlesztő rendelkezésére.

### 5.2. Emulált EEPROM

Számos beágyazott rendszerben van szükség nem felejtő memória használatára, a CR-PM3 esetében például a kalibrációs adatokat mindenkorábban el kell tárolni, ezek pedig legyártott készülékenként változni fognak, amely az alkatrészek szórásából következik. Ezek a nem felejtő memóriák leggyakrabban külső flash, vagy EEPROM típusúak, újabban pedig már az MRAM magnetorezisztív adattárolók szerepe is növekszik. Ezek a nem felejtő memóriák viszonylag alacsony plusz költséget jelentenek, a hely igényük a nyomtatott áramkörön 1cm<sup>2</sup> alatti, ez pedig a legtöbb alkalmazásban nem jelent szűk keresztemetszetet.

Mindezek ellenére, érdemes gondolni arra, hogy a mai mikrokontrollerek programmemóriája flash, amit menet közben is tudunk page-enként törölni, illetve szavanként írni. Miért kellene külön alkatrészeket beletervezni az áramkörbe, kommunikációs interfészeket használni, ha a beépített flashben néhány lap kijelölésével ugyanúgy egy nem felejtő memóriát tudunk létrehozni?

Az STMicroelectronics által kiadott emulált EEPROM driverek segítségével könnyen megvalósíthatjuk a nemfelejtő memóriát, a fejlesztőnek mindenkorábban definiált konstans értékét kell megadni, majd néhány függvény használatával egyszerűen írni és olvasni a

| Jellemző                  | Külső EEPROM | Emulált EEPROM     |
|---------------------------|--------------|--------------------|
| Írási idő                 | 20ms         | 244 $\mu$ s...82ms |
| Törlési idő               | 5ms/bájt     | 20...40ms/page     |
| Olvasási idő              | 92 $\mu$ s   | 10...300 $\mu$ s   |
| Írási/Törlési ciklus szám | 1 millió     | 10 ezer/page       |

**5.1. táblázat.** EEPROM és emulált EEPROM összehasonlítása 32 bites adatokon

változókat. Mivel a flash memória egyik sajátossága, hogy már egyszer írt memória területet csak törlés után lehet újra írni, illetve törölni csak egész lapokat lehet, így az emulált EEPROM megvalósításához legalább két lapra van szükség. Az emulált EEPROM-ban 16 bites adatregiszterek vannak, ezekhez pedig 16 bites virtuális címek tartoznak. A driver beírás esetén a lista legvégére írja a virtuális címet és az adatot. A flash memóriában törlés után minden bit 1-es értéket vesz fel, ezt használja ki az olvasás függvény, ami az emulált EEPROM memória végét a 0xFFFF virtuális című regiszterrel detektálja. Az olvasás, amennyiben több azonos címet is talál a memóriában, mindig a legutolsó értékét adja vissza, hiszen ezt írtuk be legutoljára. Amennyiben a kijelölt lap betelne, a driver a változók legutolsó értékeit átmenti egy másik lapra, majd törli a betelt lapot. A driver publikus függvényei:

```

1 uint16_t EE_Init(void);
2 uint16_t EE_ReadVariable(uint16_t VirtAddress, uint16_t* Data);
3 uint16_t EE_WriteVariable(uint16_t VirtAddress, uint16_t Data);
```

A CR-PM3-ban a legtöbb kalibrációs változó típusa egyszeres-precizitású lebegőpontos, ezek letárolása és visszaolvasása 16 bites regiszterekkel némi bit manipulációt igényel, az ezeket megvalósító függvények:

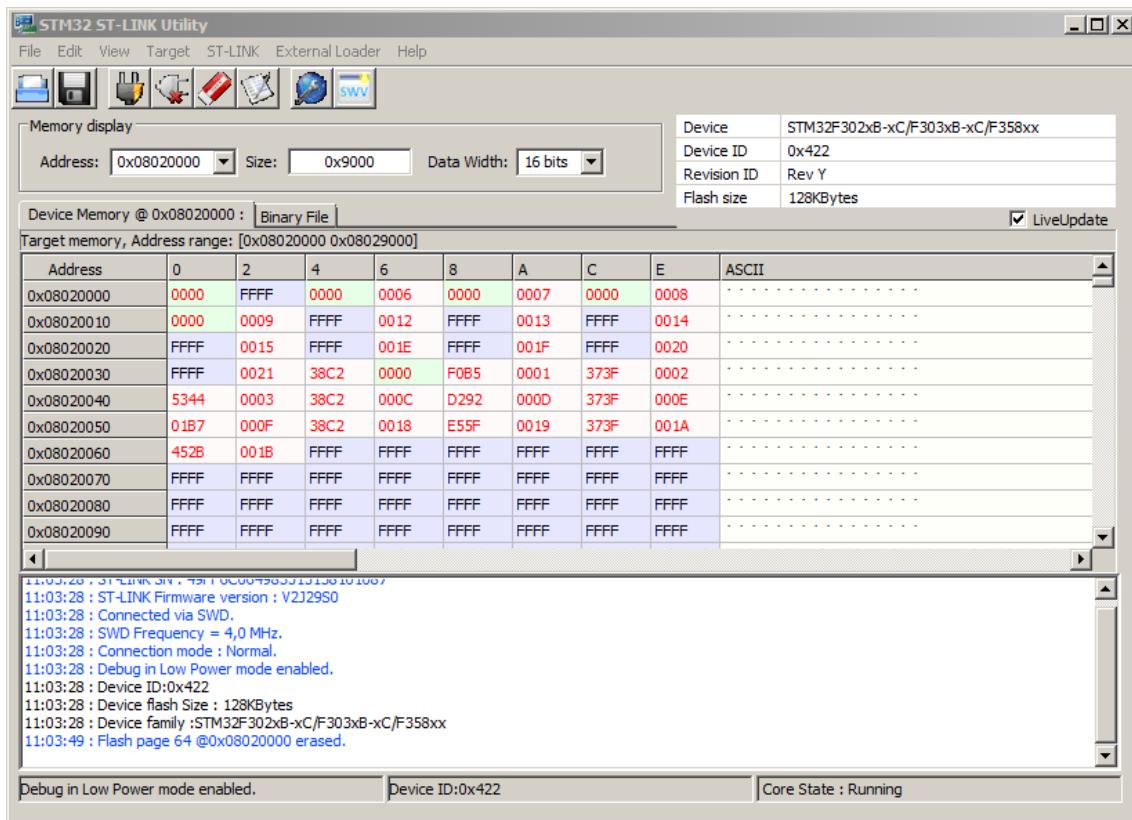
```

1 void eeStoreFloat(float data, uint16_t ee_address)
2 {
3     uint16_t ee_reg_buffer;
4     uint32_t uint32buffer;
5     float floatbuffer = data;
6     memcpy(&uint32buffer, &floatbuffer, sizeof(float));
7
8     ee_reg_buffer = (uint16_t)((uint32buffer)>>16)&0x0000FFFF;
9     EE_WriteVariable(VirtAddVarTab[ee_address], ee_reg_buffer);
10    ee_reg_buffer = (uint16_t)((uint32buffer)&0x0000FFFF);
11    EE_WriteVariable(VirtAddVarTab[ee_address+1], ee_reg_buffer);
12 }
13
14 void eeReadFloat(volatile float* calib_address, uint16_t ee_address)
15 {
16     uint16_t buffer1, buffer2;
17     uint32_t float_buffer;
18
19     EE_ReadVariable(VirtAddVarTab[ee_address], &buffer1);
20     EE_ReadVariable(VirtAddVarTab[ee_address+1], &buffer2);
21     float_buffer = (uint32_t)(buffer1 << 16);
22     float_buffer |= (uint32_t)(buffer2&0x0000FFFF);
23     memcpy((void*)calib_address, &float_buffer, sizeof(float));
24 }
```

Az emulált EEPROM használata közben rendkívül nagy segítségnek bizonyult az STM32 ST-LINK Utility használata, melyben implementálva van a "LiveUpdate" funkció, mellyel futás közben monitorozhatjuk a flash memória tartalmát. Ezzel a kalibrációs függvények fejlesztése nagyban egyszerűsödött, az esetleges hibákat az első futásnál fel lehetett ismerni.

### 5.3. Firmware

A beágyazott szoftvert az STM32F303-as kontrollerre KDevelop környezetben írtam, STM32 Standard Peripheral Libraries-t, valamint a Prolan-on belül fejlesztett CR-BASE szoftver réteget használtam. Maga a környezet egy Kubuntu-t futtató virtuális gépen működött, melyet a szoftveres kollégák kifejezetten a hardverfejlesztők igényeinek megfelelően állítottak össze, ezzel megkímélve a hosszas fejlesztői környezet konfigurálástól minket. Már az áram-körtervezés folyamatában használtam az STM32CubeMX programot, amellyel egyszerűen felkonfigurálhatjuk a választott STM32-es mikrokontrollert. Mivel a cégen belül Standard Peripheral Libraries-t (SPL) alkalmazunk, a segédprogramot elsősorban nem kódgenerálásra, hanem a különböző perifériák kiosztásának ellenőrzéséhez, az ütközések elkerülésére alkalmaztam. Az SPL az STMicroelectronics által fejlesztett szoftverréteg, amely a fejlesztő elől elfedi a regiszterszintű műveleteket, azonban alacsonyabb szintű mint a szintén gyártó



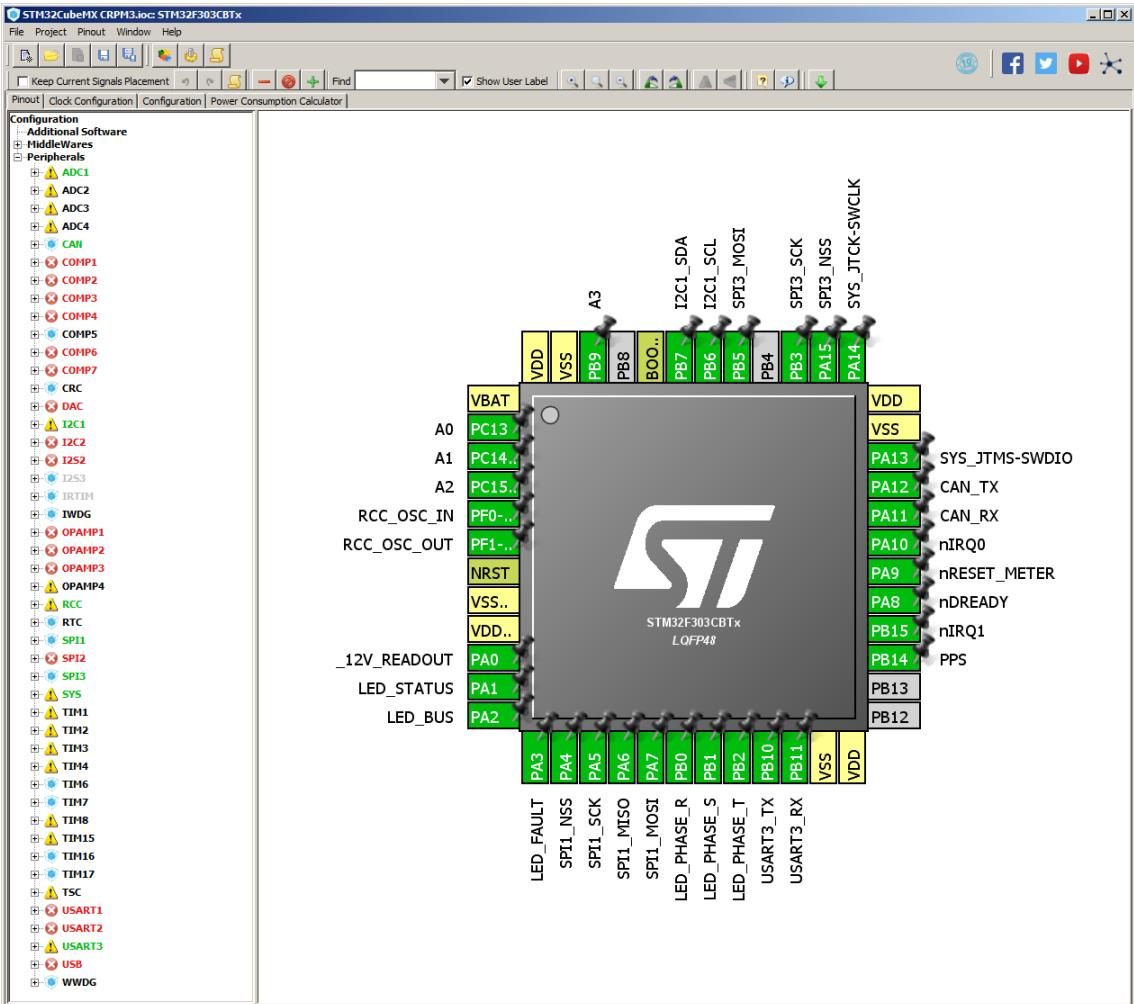
5.1. ábra. STM32 ST-LINK Utility LiveUpdate opciónal

által fejlesztett Hardware Abstraction Layer (HAL), amely például már az interruptokat is elfedi, a fejlesztőnek pedig csak callback függvényeket szolgáltat az interruptból.

### 5.3.1. Program felépítése

TODO ÁBRA ESETLEG?

A program reset után, még a hardver inicializáció előtt a különböző mérést leíró struktúrák inicializációjával kezd, az ezekben található pointerek megfelelő értékének beállításával, és listák feltöltésével. Ezen a ponton kell megadni az eszköznek, hogy pontosan melyik vizsgált paramétereket kívánjuk kiolvasni a DSP-ből.



## 5.2. ábra. STM32CubeMX konfigurációs felülete

```

1 struct meas_register reg_list_L1[MAX_NO_OF_REGS_TO_READ/3];
2 struct calib_data calibration_data_l1;
3 regs_of_interest_L1.calibration_data = &calibration_data_l1;
4 regs_of_interest_L1.no_of_regs = 0;
5 regs_of_interest_L1.reg_array = reg_list_L1;
6
7 ...
8
9 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 VRMS", AVRMS, 4, _signed,
10   voltage, 50);
11 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 IRMS", AIRMS, 4, _signed,
12   current, 50);
13 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 FVRMS", AFVRMS, 4, _signed,
14   voltage, 50);
15 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 FIRMS", AFIRMS, 4, _signed,
16   current, 50);
17 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 POWER", AWATT, 4, _signed,
18   power, 50);
19 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 ENERGY", AWATTHR, 4,
20   _signed, energy, 1);
21 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 REACTIVE ENERGY", AVARHR,
22   4, _signed, energy, 1);           53
23 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 TEMP", ATEMP, 4, _signed,
24   temperature, 1);

```

Ezt követően a flash memóriából, az emulált EEPROM-ból kiolvassa a kalibrációs adatokat, ezeket hozzárendeli a megfelelő változókhöz.

A C-RTU kötelező funkcióinak inicializációja ezután kezdődik, meghívódik a CR-BASE és C-CAN init függvény, majd a LED-ek, a CAN, a mérési paraméterek, figyelt adatok, verziók beállítása. Ezek helyes lefutása után jönnek a modul specifikus függvényhívások, a különböző perifériák, felparaméterezése. A CR-PM3-ban a különböző feladatokat a következő perifériák látják el:

1. *GPIO* A külülvilággal az MCU természetesen a be- és kimeneteit használva kommunikál, ezért ennek a perifériának a használata elengedhetetlen.
2. *Timer* Egy belső időzítőhöz használtam, amellyel rövid, a CR-BASE-ben nem implementált,  $\mu$ s-es delay függvényt készítettem.
3. *SPI* Az MCU és az ADE7978 közötti kommunikáció kétirányú SPI.
4. *DMA* Az analóg-digitális átalakító kimenetét kezelem DMA-val, így a processzor számára overhead nélkül szolgáltat információt az analóg értékekéről.
5. *ADC* A buszbeszéltséget, 3.3V-os tápfeszültséget és az integrált hőmérőt mérem vele.
6. *NVIC, EXTI* Az external interrupt-ok kezeléséhez szükséges, melyeket az ADE7978 ad ki.
7. *UART* Hibakeresés során használtam fejlesztéshez egy könnyen kezelhető interfésként.

Az inicializációk után még a CR-BASE segítségével létrejön egy-egy 1000, 500 és 100ms-es taszk, amelybe a különböző, nem időkritikus ciklikus feladatok hajthatóak végre.

Ez után bekerül a program futása a main-ben található végtelen ciklusba, amelyben a CR-BASE crBaseHandler() függvényét hívja. Ez kezeli a C-CAN üzenetek interruptos fogadását bufferelve, illetve a CR-BASE összes időzítéssel kapcsolatos funkcióját, mint például a LED-ek villogtatását, vagy bármilyen előre regisztrált függvény meghívását.

A modul működése során a három regisztrált ciklikus taszk-ban, interruptokban, illetve DMA segítségével történnek a különböző funkciók.

1. *tickHandler1000()*: Elsősorban debug funkciók megvalósítására volt használva, a különböző gyors események láthatóvá tételehez, például, hogy valamilyen hiba bekövetkezte után csak néhány másodperc után kapcsoljon le a hiba LED.

```

1 void tickHandler1000()
2 {
3     if(metering_flt_cnt > 0)
4     {
5         metering_flt_cnt--;
6     }
7     else
8     {
9         ledOffSys(LED_SYS_FLT);
10    }
11 }
```

2. *tickHandler500()*: A jelenlegi prototípuson itt történik a CR-BASE számára az értékek frissítése. Amennyiben a CR-BASE szignifikancia, vagy időzítési kritériumai alapján szükséges, akkor ezután küldi fel az alapkészüléknek a mért adatokat.
3. *tickHandler100()*: Mivel a nullvezetőt figyelő bemenetre nem használható a nullátmenet interrupt, így az ehhez tartozó értékek frissítése ebben a taszkban történik.
4. *EXTI interrupt*: Az ADE7978 három konfigurálható interrupt kimenettel rendelkezik, melyek mindegyike be van kötve az STM32-es kontrollerbe, azonban a jelenlegi alkalmazásban ezek közül csak egy láb van használatba. A DSP egyik maszk regiszterének írásával lehet engedélyezni a különböző események hatására az interruptokat, amelyek ugyanazt a lábat húzzák alacsony logikai értékre. Ahhoz, hogy az interrupt forrását eldöntsük, ki kell olvasni a maszk regiszterhez tartozó státusz regisztert, és ott meg kell vizsgálni az interrupt bitek állapotát, majd a megfelelő érték beírásával törölni a flaget. Későbbi alkalmazásban elképzelhető, hogy több interruptot is használni kell majd, de jelenleg a használt interruptok a következők: reset utáni belső inicializáció kész, illetve a három fázison a feszültség nullátmenet események. Ezeknek a figyelése azért fontos, mert az ADE7978 a legtöbb számolt paramétert hálózati ciklusonként számolja ki, így érdemes ezen eseményekre szinkronizálni, hogy minden eredményt kiolvassunk, de véletlenül se olvassuk ki ugyanazt az értéket többször, majd ezeket átlagolni tudjuk. Egy probléma azonban ezzel a módszerrel, hogy amennyiben például a hálózati feszültség nullátmenet nélkül állna be egy hibás állapotba, a kiolvasott érték nem tükrözne a valóságot. Ezt kiküszöbölni kivétel kezeléssel lehet, az egyik ciklikus taszk felügyeletével. Amennyiben nem érkezik adott időn belül nullátmenet interrupt, frissítjük a fázishoz tartozó értékeket a DSP megfelelő azonnali érték regiszterével.
5. *DMA*: Az ADC által beolvasott négy csatorna: a hátlapi 12V, a 3.3V a VBAT bemeneten keresztül, az integrált hőmérő, valamint a beépített feszültség referencia. Ennek a négy értéknek a konverziója folyamatosan fut az ADC-ben, és amikor egy konverziós sorozat befejeződik, akkor elsül egy belső jel, aminek a hatására a DMA kiolvassa az eredményt, és áthelyezi egy-egy globális változóba azokat. Ez a teljes

folyamat a processzortól független, azt egyáltalán nem terheli. Ugyan az interruptos lekezelése az ADC-nek is megfelelő lett volna, a számítási teljesítmény elbírná, azonban a fejlesztés szempontjából sokkal kényelmesebb, hiszen a konverzió befejeződésének interruptjával így nem kell foglalkozni, a program futását az nem akasztja meg, a változók egyszerűen "maguktól frissülnek".

### 5.3.2. Mérő IC-t kezelő függvények, struktúrák

A firmware készítése során amennyire lehetett, az objektum orientáltságra törekedtem, így a mérési eredmények, kalibrációs adatok és beállítások struktúrákban vannak tárolva. Ahol csak lehetett a hibák elkerülésének érdekében enum típusokat vettem fel.

```

1 enum issigned{
2     _signed,
3     _unsigned
4 };
5
6 enum dimension{
7     voltage,
8     current,
9     power,
10    energy,
11    temperature,
12    scalar
13 };
14
15 struct meas_register{
16     const char* tag;
17     int64_t value;
18     int64_t avg_acc;
19     uint32_t avg_cnt;
20     uint32_t avg_cycles;
21     uint16_t reg_addr;
22     uint8_t reg_size;
23     enum issigned type;
24     enum dimension dimension;
25 };

```

A `meas_register` struktúra írja le az egyes mérendő változókat, a mérési módjukat:

1. *tag*: Egy konstans string, amely az emberi olvasásra alkalmas nevét tartalmazza a regiszternek, így debug célokra kiváló.
2. *value*: Az átlagolt értéke a regiszternek.
3. *avg\_acc*: Az átlagoláshoz szükséges akkumulátor változó.

4. *avg\_cnt*: Az átlagoláshoz szükséges futó változó.
5. *avg\_cycles*: Az átlagoláshoz használt minták számát határozza meg.
6. *reg\_addr*: A regiszter címe az ADE7978-ban.
7. *reg\_size*: A regiszter mérete bájtokban kifejezve.
8. *type*: Megmutatja, hogy előjeles, vagy előjel nélküli változóként kezeljük a regisztert.
9. *dimension*: A mérődő mennyiségi dimenzióját adja meg, mely lehet feszültség, áram, teljesítmény, energia, hőmérséklet, vagy pedig skalár.

```

1 struct calib_data{
2     float v_lsb;
3     float i_lsb;
4     float wh_lsb;
5     int32_t vgain;
6     int32_t igain;
7     int32_t phcal;
8 };
9
10 struct regs_of_interest_type{
11     struct meas_register* reg_array;
12     struct calib_data* calibration_data;
13     uint8_t no_of_regs;
14 };

```

A *meas\_register*-eket *regs\_of\_interest\_type* struktúrák foglalják össze fázisonként. Ezekhez hozzá van rendelve továbbá a kalibrációs adatokat tartalmazó *calib\_data* struktúra egy-egy példánya, valamint egy változó tartalmazza a felvett *meas\_register*-ek számát.

A *regs\_of\_interest\_type* gyűjtő objektumok kezelése egy hozzáadó, egy frissítő, és egy kiolvasó függvényel történik.

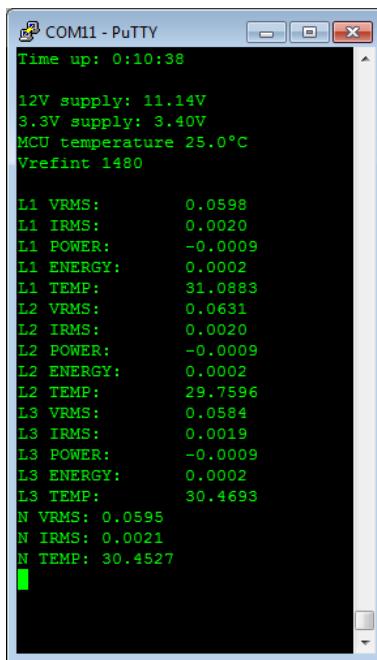
```

1 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 VRMS", AVRMS, 4, _signed,
2   voltage, 50);
3 ...
4
5 updateRegsOfInterest(regs_of_interest_L1);
6 ...
7 ...
8
9 output_buffer[1] = readRegsOfInterest(regs_of_interest_L1, "L1 VRMS");

```

### 5.3.3. Debug UART

A fejlesztés támogatásához a készülékben helyet kapott egy kivezetett UART port. Ennek a kezelése sokkal egyszerűbb, mint a C-CAN használata, így egyszerű diagnosztikához kitűnően alkalmas. A jobb átláthatóság érdekében a porton nem egyszerűen kiírja az eszköz az adatokat, illetve szöveges üzeneteket, hanem ANSI escape karakterek használatával egy VT100 terminál vezérlést valósít meg, kurzor mozgatásokkal, így hosszabb képernyő tartalmak esetén sem fog villogni a kép, az előző képernyő tartalmát egyszerűen felülírja az új. A VT100 terminál kezelése esetén minden vezérlőutasítás előtt az "Esc" ASCII karaktert kell kiküldeni, amelynek értéke 0x1B.



```
Time up: 0:10:38

12V supply: 11.14V
3.3V supply: 3.40V
MCU temperature 25.0°C
Vrefint 1480

L1 VRMS:      0.0598
L1 IRMS:      0.0020
L1 POWER:     -0.0009
L1 ENERGY:    0.0002
L1 TEMP:       31.0883
L2 VRMS:      0.0631
L2 IRMS:      0.0020
L2 POWER:     -0.0009
L2 ENERGY:    0.0002
L2 TEMP:       29.7596
L3 VRMS:      0.0584
L3 IRMS:      0.0019
L3 POWER:     -0.0009
L3 ENERGY:    0.0002
L3 TEMP:       30.4693
N VRMS:       0.0595
N IRMS:       0.0021
N TEMP:        30.4527
```

5.3. ábra. Debug soros port kimenete

A fejlesztés során többször fordult elő, hogy valamilyen hibás konfigurálás következtében már az inicializáció során elakadt a program futása, ezek forrását a debug interfész segítségével rendkívül egyszerűen, egy-egy sor vagy változó kiíratásával meg lehetett találni.

## 5.4. Linux oldali szoftver <- ide csak a crweb

TODO

Az alapkészülékben a csomagok fogadását, a paraméterezést viszonylag kevés munkával, egy SQL adatbázis .....

## 5.5. Gyártás támogatás

Egy gyártott terméknek elengedhetetlen a tesztelése mielőtt azt eladásra szánja az előállító. Ez kis darabszámnál még történhet egyedi mérések alapján, melyet a fejlesztő, vagy

The screenshot shows a web browser window titled "CRTU-B Web". The address bar says "Nem biztonságos | 10.63.255.4". The page header includes "Alkalmazások", "CRTU-B Web", "littelfuse\_varistor\_lv\_u", "AN-1333 (Rev. 0)", "AN-1259 (Rev. 0)", "ANSI/VT100 Terminal", "Working with OrCAD S...", "Projects - Dashboard", and "PBO16-V10 elésztés". The main content area has a green header "C-RTU Web" with a logo. On the left, there's a sidebar with "C-CAN Modulok" and a dropdown menu "unkown (addr: 0. há...)" which is expanded to show "Adatok", "Tulajdonságok", "Paraméterek", "Processzerek", and "Élő kapcsolat" with "ONLINE". The main table is titled "Adatok" and has columns: Id, Tipus, Név, Érték, Keletkezési idő, Beérkezési idő, and Státusz. The table contains 29 rows of data, mostly labeled as "MEASURE".

| Id | Tipus   | Név                    | Érték          | Keletkezési idő     | Beérkezési idő      | Státusz    |
|----|---------|------------------------|----------------|---------------------|---------------------|------------|
| 12 | MEASURE | L1 fázis hőmérséklet   | 31.2885 °C     | 2016.11.03 20:08:27 | 2016.11.03 20:08:27 | 0x00000000 |
| 13 | MEASURE | L1 fázis feszültség    | 0.0957217 V    | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 14 | MEASURE | L1 fázis áram          | 0.00196878 A   | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 15 | MEASURE | L1 fázis teljesítmény  | 0 W            | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 16 | MEASURE | L1 fázis energia       | 103.597 Wh     | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 17 | MEASURE | L2 fázis hőmérséklet   | 30.3755 °C     | 2016.11.03 20:10:50 | 2016.11.03 20:10:50 | 0x00000000 |
| 18 | MEASURE | L2 fázis feszültség    | 0.0757132 V    | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 19 | MEASURE | L2 fázis áram          | 0.000203808 A  | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 20 | MEASURE | L2 fázis teljesítmény  | 0 W            | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 21 | MEASURE | L2 fázis energia       | 0.000666882 Wh | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 22 | MEASURE | L3 fázis hőmérséklet   | 32.0699 °C     | 2016.11.03 20:10:50 | 2016.11.03 20:10:50 | 0x00000000 |
| 23 | MEASURE | L3 fázis feszültség    | 0.379787 V     | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 24 | MEASURE | L3 fázis áram          | 0.00203456 A   | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 25 | MEASURE | L3 fázis teljesítmény  | -0.000926225 W | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 26 | MEASURE | L3 fázis energia       | 0.00056191 Wh  | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 27 | MEASURE | Nullvezető hőmérséklet | 31.0611 °C     | 2016.11.03 20:10:50 | 2016.11.03 20:10:50 | 0x00000000 |
| 28 | MEASURE | Nullvezető feszültség  | 0.0607772 V    | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |
| 29 | MEASURE | Nullvezető áram        | 0.00209212 A   | 2016.11.03 20:11:33 | 2016.11.03 20:11:33 | 0x00000000 |

5.4. ábra. CR-WEB fejlesztői felület

egy technikus végez el minden legyártott darabon, azonban ez nem jó hatásfokú, valamint nagyobb darabszámnál szűk keresztmetszetet jelenthet a termék előállításában, eladásában. Ezt a tesztet összevonhatjuk a termék kalibrációjával, amely szintén elengedhetetlen egy pontos mérő gyártásánál, hiszen minden felhasznált alkatrésznek lesz valamilyen szórása ezen eltérések kiküszöböléséhez pedig valamilyen precíziós jelforráshoz kell hasonlítani az elkészült mérőt, majd az eredmény alapján a lehető legjobban eliminálni a rendszeres hibákat. A végmérés és kalibráció összevonása után egy egyszerűen végrehajtható leírást kapunk, melyet lépésről lépésre követve meggyőződhetünk a gyártott termék helyességéről, valamint kalibráció után garantálhatjuk a specifikált pontosságot. Ezen összevont folyamathoz a legjobb megoldás egy végmérő- és kalibrálószoftvert készíteni, amellyel egy kezelő egyszerűen elvégezheti ezeket a feladatokat lépésről lépésre.

### 5.5.1. Végmérés és kalibráció

A végmérés és kalibráció a CR-PM3 esetében gyakorlatilag szétválaszthatatlan, mivel a külvilág felé a kimeneti minden fölött található LED-ek, az összes csatlakozón mérőbemenet található, ezeknek pedig elengedhetetlen a kalibrációja, e közben pedig meggyőződhetünk a helyes működésről.

A kalibrációhoz szükséges precíz jelforrást egy Omicron gyártmányú CMC 356 műszer biztosította. Ez egy egyszerűen használható PC-s felületet biztosít, de később, amennyiben szükséges, távoli vezérlés is megvalósítható egy automatizált teszthez. A műszer specifikációja háromfázisú konfigurációban:

| Paraméter                                | Érték                        |
|--|------------------------------|
| Feszültségtartomány                      | 0...300VAC                   |
| Feszültséggenerátor tipikus pontossága   | <0.03% reading + 0.01% range |
| Feszültséggenerátor garantált pontossága | <0.08% reading + 0.02% range |
| Áramtartomány                            | 0...64AAC                    |
| Áramgenerátor tipikus pontossága         | <0.05% reading + 0.02% range |
| Áramgenerátor garantált pontossága       | <0.15% reading + 0.05% range |
| Generátorok frekvencia pontossága        | ±0.5ppm                      |
| Névleges frekvenciatartomány             | 10...1000Hz                  |
| Teljes frekvenciatartomány               | 10...3000Hz                  |

**5.2. táblázat.** *Omicron CMC 356 specifikációja háromfázisú konfigurációban*

TODOTODTOD

## 6. fejezet

### Példaalkalmazás

Ősz végére a termék elérte azt a készségi szintet, hogy azt egy példaalkalmazásban kipró-bálhassuk, hogy ott minél több tapasztalatot szerezzünk, az esetleges hardver vagy szoftver hibák napvilágot láthassanak.

A CR-PM3-at TODO

# Összefoglalás

TODO

# Köszönetnyilvánítás

TODO

# Ábrák jegyzéke

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Aktív PFC felépítése . . . . .                                      | 8  |
| 1.2. Hosszú kimaradások ideje évente . . . . .                           | 9  |
| 2.1. C-RTU család . . . . .  | 10 |
| 2.2. C-RTU alapkészülék . . . . .  | 11 |
| 3.1. Lineáris optocsatolós analóg jel leválasztás . . . . .              | 16 |
| 3.2. Áramváltó transzformátor működési elve . . . . .                    | 17 |
| 3.3. Rogowski-tekercs . . . . .  | 18 |
| 3.4. Négy kivezetéses árammérő sönt . . . . .                            | 18 |
| 3.5. Kompenzált Hall-szenzoros árammérő fluxus koncentrátorral . . . . . | 19 |
| 3.6. Rendszer felépítése . . . . .                                       | 22 |
| 3.7. Áramváltó nélküli mérési elrendezés . . . . .                       | 23 |
| 4.1. RT7285/A alapú kapcsolóüzemű tápegység . . . . .                    | 28 |
| 4.2. A mikrokontroller és közvetlen környezete . . . . .                 | 30 |
| 4.3. A mikrokontrollerhez tartozó tápszűrés . . . . .                    | 31 |
| 4.4. Az áramméréshez tartozó bemeneti áramkör . . . . .                  | 31 |
| 4.5. Átlapolódás jelensége az ADC bemenetén . . . . .                    | 32 |
| 4.6. A feszültségméréshez tartozó bemeneti áramkör . . . . .             | 33 |
| 4.7. A varisztor [25] . . . . .  | 35 |
| 4.8. CR-PM3A és CR-PM3C . . . . .  | 36 |
| 4.9. Szigeteléskoordináció IEC 60664 alapján . . . . .                   | 37 |
| 4.10. EMC vizsgálatok osztályzása . . . . .                              | 39 |
| 4.11. Emisszió csökkentése integrált izolált táp esetén [20] . . . . .   | 41 |
| 4.12. Emisszió csökkentésének tényleges megvalósítása [19] . . . . .     | 41 |
| 4.13. ESD mérési összeállítás . . . . .                                  | 43 |
| 4.14. ESD teszt csatoló síkokkal . . . . .                               | 43 |
| 4.15. Burst és surge teszt mérési összeállítása . . . . .                | 44 |
| 4.16. Szimulátor beállításai burst teszthez . . . . .                    | 45 |
| 4.17. Szimulátor beállításai surge teszthez . . . . .                    | 45 |
| 4.18. Vezetett RF zavarok mérési összeállítása . . . . .                 | 46 |
| 4.19. CR-PM3 összeállítása . . . . .                                     | 47 |
| 4.20. CR-PM3 a készülékházban . . . . .                                  | 48 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.1. | STM32 ST-LINK Utility LiveUpdate opcióval . . . . . | 52 |
| 5.2. | STM32CubeMX konfigurációs felülete . . . . .        | 53 |
| 5.3. | Debug soros port kimenete . . . . .                 | 58 |
| 5.4. | CR-WEB fejlesztői felület . . . . .                 | 59 |

# Táblázatok jegyzéke

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1. | AF500 ProField modul specifikációja . . . . .   | 14 |
| 3.2. | Feszültségmérési megoldások . . . . .   | 17 |
| 3.3. | Árammérési megoldások . . . . .   | 19 |
| 3.4. | 16451-es áramváltó transzformátor pontossága terhelés függvényében . . . . .                | 22 |
| 3.5. | ADE7978 tipikus pontossági értékei 0.1%-os alkatrészek alkatrészek alkalmazásával . . . . . | 24 |
| 4.1. | RT7285/A fontosabb jellemzői . . . . .  | 28 |
| 4.2. | IEC 62052-11:2003 által támasztott EMC immunitási követelmények . . . . .                   | 42 |
| 5.1. | EEPROM és emulált EEPROM összehasonlítása 32 bites adatokon . . . . .                       | 50 |
| 5.2. | Omicron CMC 356 specifikációja háromfázisú konfigurációban . . . . .                        | 60 |

# Irodalomjegyzék

- [1] MSZ EN 60664-1:2008, Kisfeszültségű rendszerek villamos szerkezeteinek szigetelés-koordinációja. 1. rész: Alapelvek, követelmények és vizsgálatok (IEC 60664-1:2007). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 05 2008.
- [2] MSZ EN 62052-11:2003, Váltakozó áramú villamos fogyasztásmérő berendezések. Általános követelmények, vizsgálatok és vizsgálati feltételek. 11. rész: Fogyasztásmérő berendezések (IEC 62052-11:2003). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 05 2003.
- [3] CEER 6th Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply. Jelentés, Council of European Energy Regulators (CEER), 09 2016.
- [4] EM TEST (Switzerland) GmbH. The structure of EMC standards (2018. november 12.). [http://www.emtest.com/what\\_is/standards.php](http://www.emtest.com/what_is/standards.php).
- [5] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 6-1. rész: Általános szabványok. Zavartűrés a lakóhelyi, a kereskedelmi és az enyhén ipari környezetekre (IEC 61000-6-1:2005). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 07 2007.
- [6] Elektromágneses összeférhetőség. Háztartási készülékek, villamos szerszámok és hasonló eszközök követelményei. 1. rész: Zavarkibocsátás (CISPR 14-1:2005). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 04 2007.
- [7] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 4-2. rész: Vizsgálati és mérési módszerek. Elektrosztatikus kisüléssel szembeni zavartűrési vizsgálat (IEC 61000-4-2:2008). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 09 2009.
- [8] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 4-4. rész: Vizsgálati és mérési módszerek. Gyors villamos tranziens/burst jelenségekkel szembeni zavartűrési vizsgálat (IEC 61000-4-4:2012). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 03 2011.
- [9] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 4-5. rész: Vizsgálati és mérési módszerek. Lökhullámmal szembeni zavartűrési vizsgálat (IEC 61000-4-5:2014). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 12 2014.
- [10] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 4-6. rész: Vizsgálati és mérési módszerek. Rádiófrekvenciás terek által keltett, vezetett zavarokkal szembeni zavartűrés vizsgálata (IEC 61000-4-6:2013). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 05 2014.

- [11] Schneider Electric. Schneider legacy products - 16451 (2018. november 21.). <https://www.schneider-electric.com.au/en/product/16451/current-transformer-ti-50-5-a---for-cable-%C3%B8-21-mm/>.
- [12] UM0892, STM32 ST-LINK utility software description. User manual, STMicroelectronics, 10 2018.
- [13] AN4056, EEPROM emulation in STM32F30x/STM32F31x/STM32F37x/STM32F38x microcontrollers. Application note, STMicroelectronics, 09 2012.
- [14] UM1718, STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation. User manual, STMicroelectronics, 11 2018.
- [15] DS9118, STM32F303xB STM32F303xC datasheet. Datasheet, STMicroelectronics, 10 2018.
- [16] ADE7978/ADE7933/ADE7932/ADE7923. Datasheet, Analog Devices, 11 2018.
- [17] AN-1259, Calibrating the ADE7978 and ADE7932/ADE7933 Isolated Metering Chipset. Application note, Analog Devices, 2013.
- [18] AN-1333, Architecting a Direct, 3-Phase Energy Meter with Shunts Using the ADE7932/ADE7933/ADE7978. Application note, Analog Devices, 2014.
- [19] The EMI benefits of ground plane stitching in multi-layer power bus stacks. Tanulmány, Xiaoning Ye, D.M. Hockanson, Min Li, Wei Cui, S. Radu, J.L. Drewniak, T.P. VanDoren, T.H. Hubing, R.E. DuBroff, 08 2000.
- [20] Anand Reghunathan, Koteswar Rao, Anant Kamath. How to achieve low radiated emissions with fully integrated data and power isolation (2018. november 25.). <https://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4458172>.
- [21] Prolan Zrt. Kompakt mérésadatgyűjtő, vezérlő rendszer (c-rtu) (2018. november 25.). <http://www.prolan.hu/hu/megoldasok/CRTU>.
- [22] OMICRON electronics GmbH. Cmc 356 universal relay test set and commissioning tool (2018. november 25.). <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-356/>.
- [23] Dr. Balogh Attila (BME-AUT). Készüléktervezés jegyzet: 9. túlfeszültség védelem. [https://www.aut.bme.hu/Upload/Course/VIAUMA14/hallgatoi\\_segedletek/T%c3%balfesz%c3%bcclts%c3%a9g\\_v%c3%a9delem.pdf](https://www.aut.bme.hu/Upload/Course/VIAUMA14/hallgatoi_segedletek/T%c3%balfesz%c3%bcclts%c3%a9g_v%c3%a9delem.pdf).
- [24] Dr. Balogh Attila (BME-AUT). Készüléktervezés jegyzet: 8. túláramvédelem. [https://www.aut.bme.hu/Upload/Course/VIAUMA14/hallgatoi\\_segedletek/T%c3%bal%c3%airam\\_v%c3%a9delem.pdf](https://www.aut.bme.hu/Upload/Course/VIAUMA14/hallgatoi_segedletek/T%c3%bal%c3%airam_v%c3%a9delem.pdf).
- [25] ElectronicsTutorials. Varistor tutorial (2018.12.11.). <https://www.electronics-tutorials.ws/resistor/varistor.html>.

# Függelék

## F.1. Függelék 1

TODO