



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>9</b>
2.1. Alapkészülék . . . . .	9
2.2. Kiegészítő modulok . . . . .	10
2.3. Mechanikai kialakítás . . . . .	11
<b>3. Rendszer jellemzők</b>	<b>12</b>
3.1. Specifikáció . . . . .	12
3.2. Feszültségmérés . . . . .	13
3.2.1. Feszültségváltó transzformátor . . . . .	13
3.2.2. Ellenállásosztó és izolációs erősítő . . . . .	13
3.2.3. Ellenállásosztó és leválasztott ADC . . . . .	14
3.3. Árammérés . . . . .	14
3.3.1. Áramváltó transzformátor . . . . .	14
3.3.2. Rogowski-tekercs . . . . .	15
3.3.3. Sönt ellenállás és izolációs erősítő . . . . .	16
3.3.4. Hall-szenzoros árammérő . . . . .	16
3.4. Adatfeldolgozás . . . . .	16
3.4.1. Digitális Jelfeldolgozó Processzor . . . . .	16
3.4.2. Programozható Logika . . . . .	16
3.4.3. Mérő IC, beégetett DSP kóddal . . . . .	17
3.5. Választott megoldás . . . . .	17
3.5.1. Elméleti specifikáció, funkcionalitás . . . . .	18
<b>4. Hardver konstrukció</b>	<b>21</b>
4.1. Szabványosság . . . . .	21

4.1.1. Szigeteléskoordináció . . . . .	21
4.1.2. EMC . . . . .	21
4.1.3. EMC tesztek . . . . .	26
4.1.4. Javítási tervezek . . . . .	28
4.2. Mechanika . . . . .	31
4.3. Kapcsolási rajz . . . . .	32
4.3.1. Kapcsolóüzemű tápegység . . . . .	34
4.3.2. Bemeneti áramkör - Áram bemenet . . . . .	37
4.3.3. Bemeneti áramkör - Feszültség bemenet . . . . .	38
4.4. NYÁK terv . . . . .	39
<b>5. Szoftveres komponensek</b>	<b>41</b>
5.1. Mikrokontroller . . . . .	41
5.2. Emulált EEPROM . . . . .	41
5.3. Firmware . . . . .	43
5.3.1. Program felépítése . . . . .	44
5.3.2. Mérő IC-t kezelő függvények, struktúrák . . . . .	47
5.3.3. Debug UART . . . . .	50
5.4. Linux oldali szoftver <- ide csak a crweb . . . . .	51
5.5. Gyártás támogatás . . . . .	51
5.5.1. Végmérés és kalibráció . . . . .	52
<b>6. Példaalkalmazás</b>	<b>53</b>
<b>Összefoglalás</b>	<b>54</b>
<b>Köszönnetnyilvánítás</b>	<b>55</b>
<b>Ábrák jegyzéke</b>	<b>56</b>
<b>Táblázatok jegyzéke</b>	<b>57</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>59</b>
<b>Függelék</b>	<b>60</b>
F.1. Függelék 1 . . . . .	60

## 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 1.

---

*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

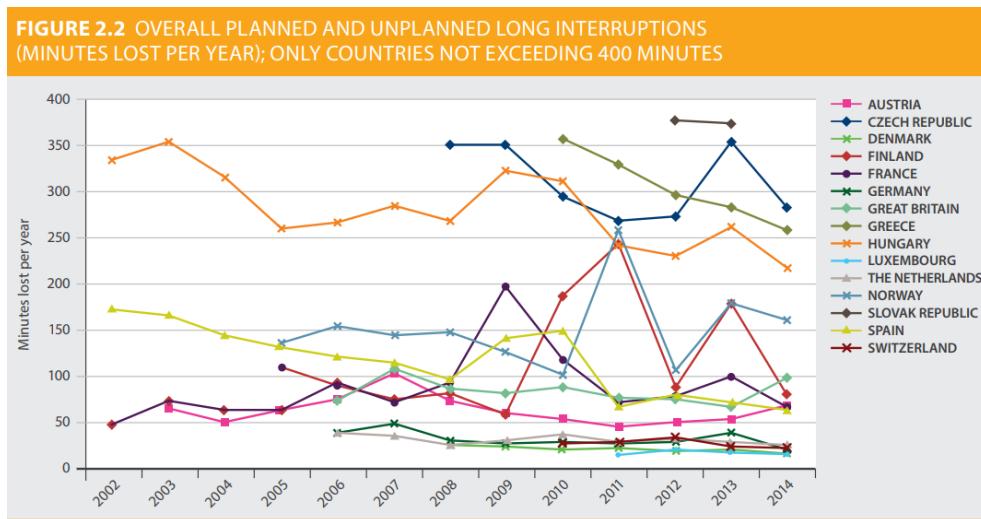
# Energetikai áttekintés

### 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, feszültséghatórések, jelentős kiesések, 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 élettartamuk végéig, annak ellenére, hogy leggyakrabban a hálózati áramfelvételük felharmonikus tartalma magas, emellett teljesítmény tényezőjük alacsony. 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 5V-ot biztosítanak a kimeneten. A magas THD tartalom egyik lehetséges hatása a primer oldali szűrőkondenzátor korai tönkremenetele, mivel azon a tervezett alapharmonikus áramösszegzetevő 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.

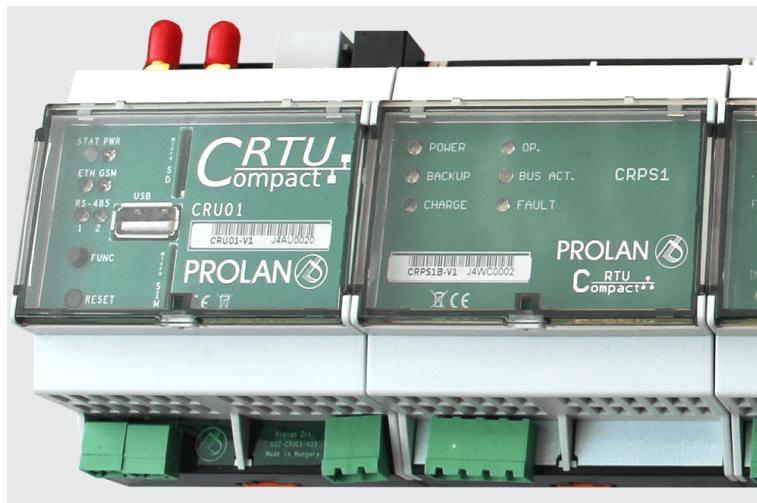


1.1. ábra. Hosszú kimaradások ideje évente

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 szolgáltatásminőség 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 irányába 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 eszközöt igényel. Diplomamunkám keretében ennek az eszköznek a fejlesztését mutatom be.

## 2. fejezet

# C-RTU család

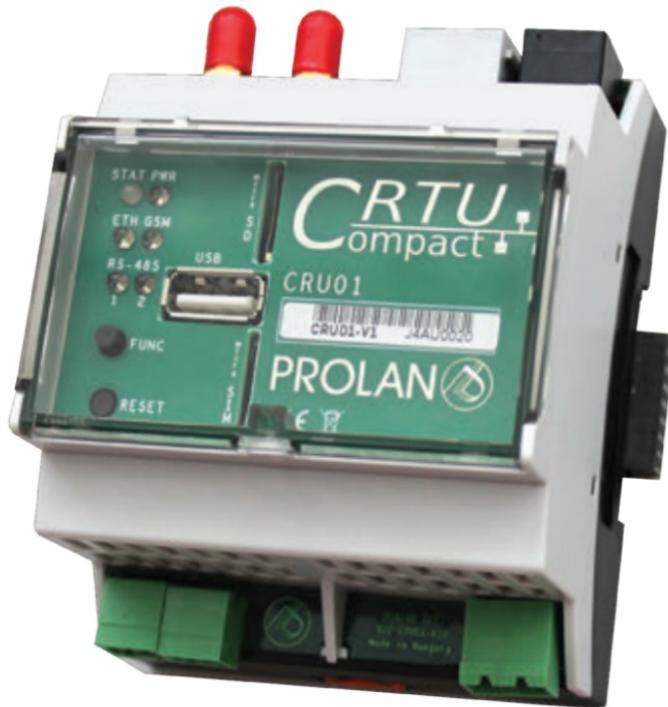


2.1. ábra. C-RTU család

A PROLAN Zrt. C-RTU családjával kisméretű, moduláris adatgyűjtő és vezérlő rendszereket lehet kialakítani. Az alapkészülék mellé számos kiegészítő modul áll rendelkezésre, melyek között CAN kommunikációval történik az adatcsere egy moduláris hátlapi buszon keresztül. Ezek a modulok lehetnek például: digitális be- és kimenetek, feszültség és árammérők, tápkimaradás áthidaló okos tápegységek, különböző kommunikációs interfések biztosító kiegészítők vagy akár elektromos jármű töltés vezérlők. A legtöbb kiegészítő modulban lévő, helyi mikrokontroller a Linux operációs rendszert futtató C-RTU alapkészülékkel CAN buszon kommunikál. A kontroller látja el a modul specifikus feladatokat, az alapkészüléknél már csak a magasabb szintű logikát, feldolgozást kell megvalósítania Linux operációs rendszer alól.

### 2.1. Alapkészülék

TODO CITÁCIÓ NXP, KARO, PROLAN!



**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 tápáramkör, aminek már csak egy bemeneti feszültségre van szüksége a működéshez.

Az alapkészülék egy 4 moduluhely (71.6mm) széles készülékházban kapott helyet. Több szoftveresen választható helyi, külső kommunikációs vonal is használható. A lehetséges konfigurációk: RS422, vagy 2 RS485 vonal, vagy egy RS485 és egy CAN busz. Hardveresen vezeték nélküli opciók közül választhatunk 2G/3G/4G GSM, vagy LTE 450, vagy LoRa kommunikációból, illetve ezek helyett optikai Ethernetet. Mindegyik alapkészülékben van továbbá egy réz alapú Ethernet port is.

## 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.

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

A modulok előlapján kötelező elhelyezni egy címbeállító dil switchet, 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.

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.

## TODO LEDEK, KÖZÖS KÖTELEZŐ FUNKCIÓK

## 2.3. Mechanikai kialakítás

A C-RTU család eszközeit a Phoenix Contact BC moduláris készülékházait használják. Ezek kalapsínre szerelhetők, illetve több méretben 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 nagy gyártási darabszámnál nem emeli jelentős mértékben a költségeket, emellett könnyű gyártani, 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 mérési megoldásnál egyformán elvárás a legalább 2.5kVeff izoláció. 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. Mivel ez a készülék nagyobb darabszámban eladtott, így ennek a specifikációját vettet alapul tervezéshez. A modul 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 fázisfeszültség-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.

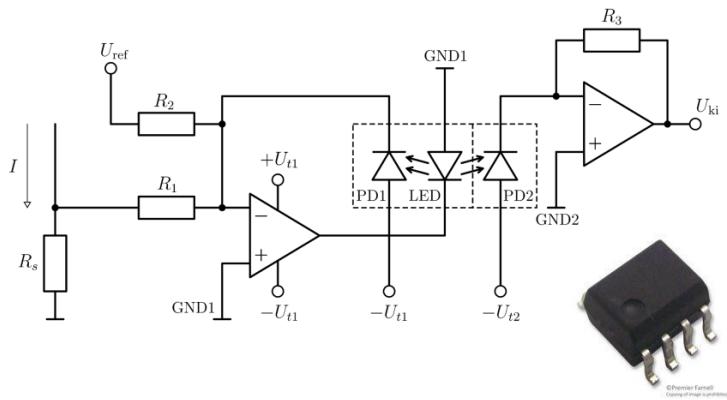
#### **3.2.1. Feszültségváltó transzformátor**

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 tárak 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 jelet a fogadó oldalra, ahol visszaalakítják analóg jelére. 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 erősítővel 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

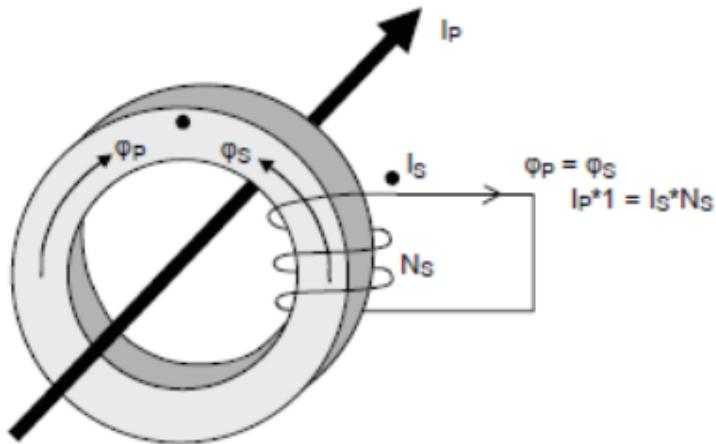
Hasonlóan az előző megoldáshoz, egy ellenállás osztóval kell leképezni az ADC mérési tartományára a feszültséget, majd az átalakítást követően a digitális kommunikációt kell leválasztani. A digitális kommunikáció leválasztására számos izolátor és optocsatoló típus áll rendelkezésre, melyek költsége alacsonyabb,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

## 3.3. 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.

### 3.3.1. Áramváltó transzformátor

A feszültségváltó transzformátorhoz hasonló megoldással az árammérés is megoldható. A transzformátor kialakítását tekintve a szekunder oldal fix menetszámmal rendelkezik, míg a



**3.2. ábra.** Áramváltó transzformátor működési elve

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 zárnak 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 áramoknál is. Ez utóbbi abból következik, hogy míg 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 lezárásáig.

### 3.3.2. Rogowski-tekercs

Egy olyan speciálisan kialakított tekercs, mely gyakran flexibilis, nyitható kivitelű. Ez lehetővé teszi az üzem közbeni felszerelését 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 tranzisztorok 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 precízitással 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.

### **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 eljárásokkal lehet védekezni, mely során több, egymás mellett elhelyezett Hall-szenzor kimenetét kell mérni, azok segítségével pedig kiszűrhető a külső tér zavaró hatása. Pontosabb típusok ára viszonylag magas. Személyes, és munkatársaim tapasztalata, illetve egyetemi tanulmányaim alapján azonban ezeknek a szenzoroknak a kimeneti jele rendkívül zajos, egy precíz mérőműszerbe nem megfelelők.

## **3.4. Adatfeldolgozás**

A lehetséges szenzor megoldások megismerése után nézzük milyen lehetséges jelfeldolgozók közül választhatunk.

### **3.4.1. 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 áramértékekkel. 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.

### **3.4.2. 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 kielégítő lehet, azonban még ezek ára is igen magas, illetve legtöbbjük 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.

### 3.4.3. Mérő IC, beégetett DSP kóddal

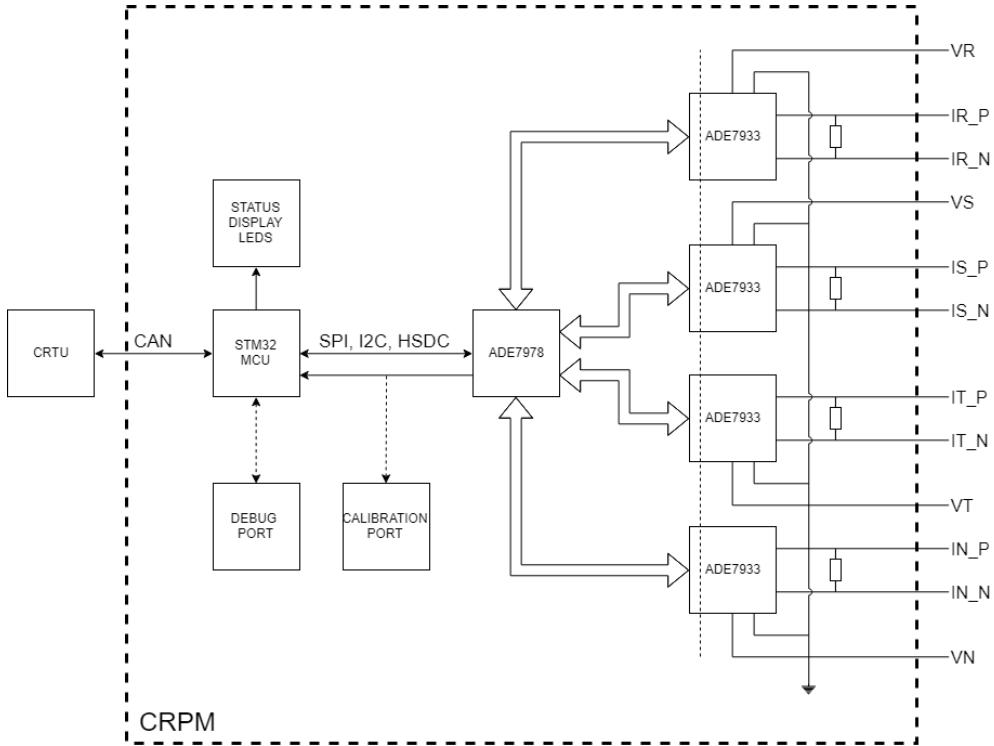
Több gyártó kínál komplett megoldásokat egy tokban realizálva. Ezek tartalmazzák az analóg front-end-et, nagy felbontású analóg-digitális átalakítót, valamint egy előre felprogramozott digitális jelfeldolgozó processzort. Az Analog Devices egyik termékcsaládja még 5kV RMS izolációt is biztosít a digitális 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 utánanezni 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.

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.

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



**3.3. ábra.** Rendszer felépítése

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

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

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.

### 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*

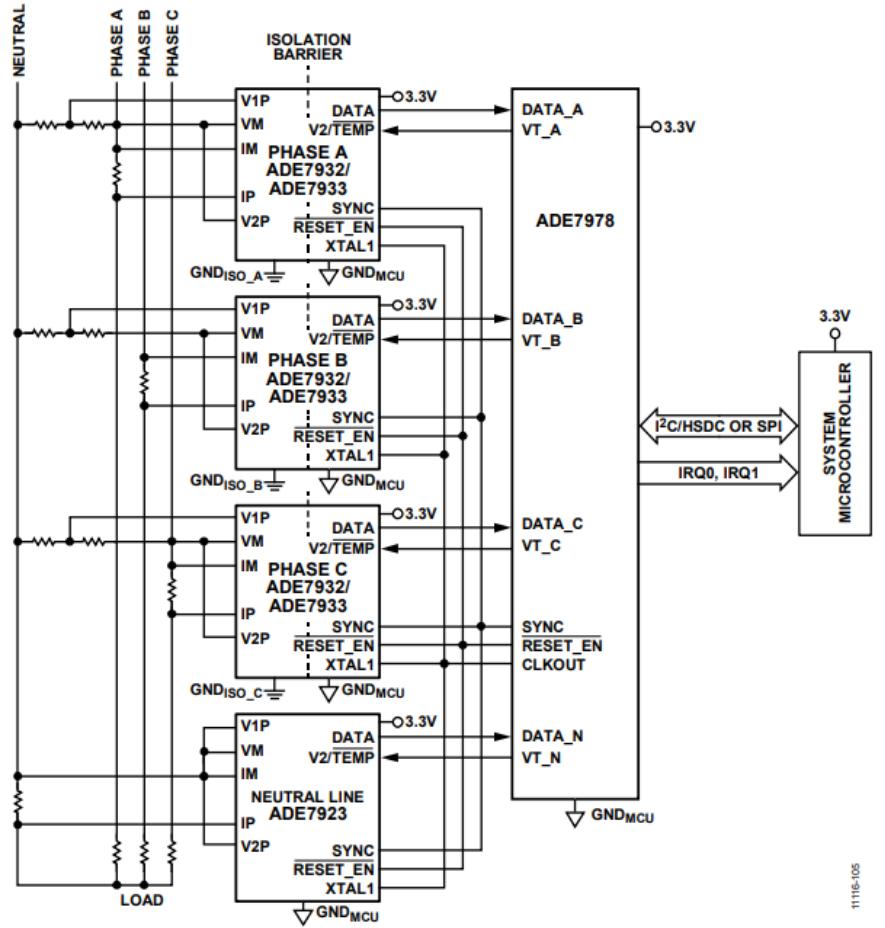


Figure 111. 3-Phase, 4-Wire Wye Meter with One ADE7978, Three ADE7933/ADE7932 Devices, and One ADE7923

**3.4. ábra.** Áramváltó nélküli mérési elrendezés

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)

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°

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

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 feszültségenben
20. Fázisonkénti teljes harmonikus torzítás az áramban
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 konstrukcio

### 4.1. 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 funkcióit tekintve akár több szabvány is érinthet, néhányra azonban csak általános szabványok vonatkoznak. 444

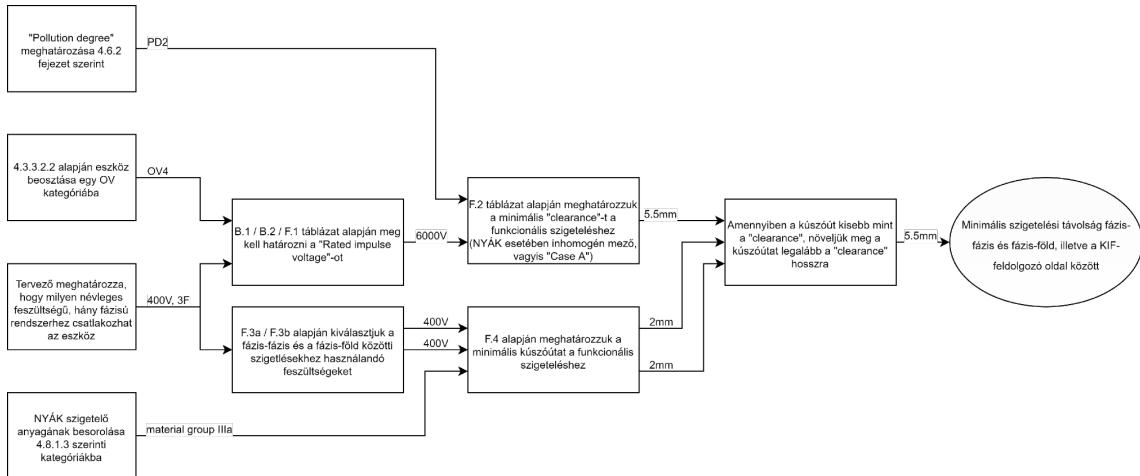
#### 4.1.1. Szigeteléskoordináció

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

#### 4.1.2. EMC

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

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



**4.1. ábra.** Szigeteléskoordináció IEC 60664 alapján

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 legkevsébé 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 kapacitív, 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 méréndő rendszert, általában csak a termék teszt alatti meghibásodásából következtethetünk ahibaforrásra. 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.

TODO CITÁCIÓZÁS [www.emtest.com](http://www.emtest.com) what is standards.php

EMC követelmények számos szabványban szerepelnek, ezek struktúrája a következő:

- Alapszabványok (Basic standards):* Ezen szabványok mutatják be a vizsgált jelenségeket, leírják a teszteszközök tulajdonságait, valamint bemutatják a szükséges mérések helyes elvégzésének lépéseit.
- 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.
- 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.

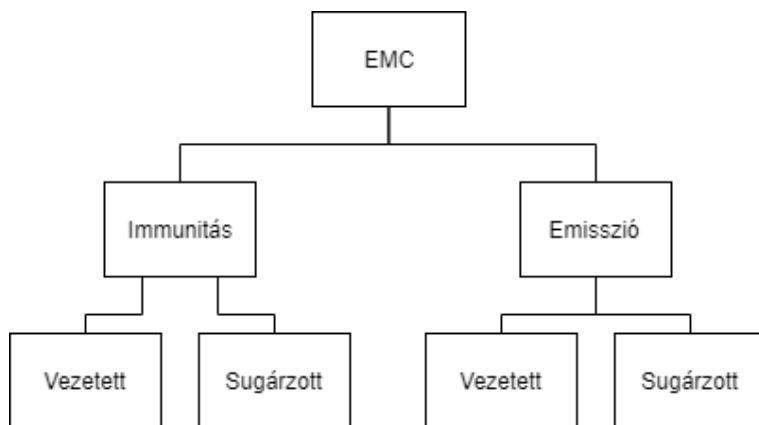
Egy termék tesztelése esetén a TODO BEHIVATKOZNI A FENTI LISTÁT I GUESS fenti listán alulról felfelé haladva kell meghatározni a legszigorúbb szinteket. Egy háztartási vízforraló példáján keresztül nézzük a lépéseket:

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

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

#### TODO KÉP A TIPIKUS FORRÁS ÉS NYELŐRŐL

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.



4.2. ábra. EMC vizsgálatok osztályzása

#### Immunitás

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

1. *Burst*: Ez a zavar egy kontaktuson kialakult, prelegő ív sorozat hatását utánozza. A hatását csökkenteni megfelelő földeléssel, közösmódusú fojtó tekercsekkel lehet.

2. *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.
3. *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

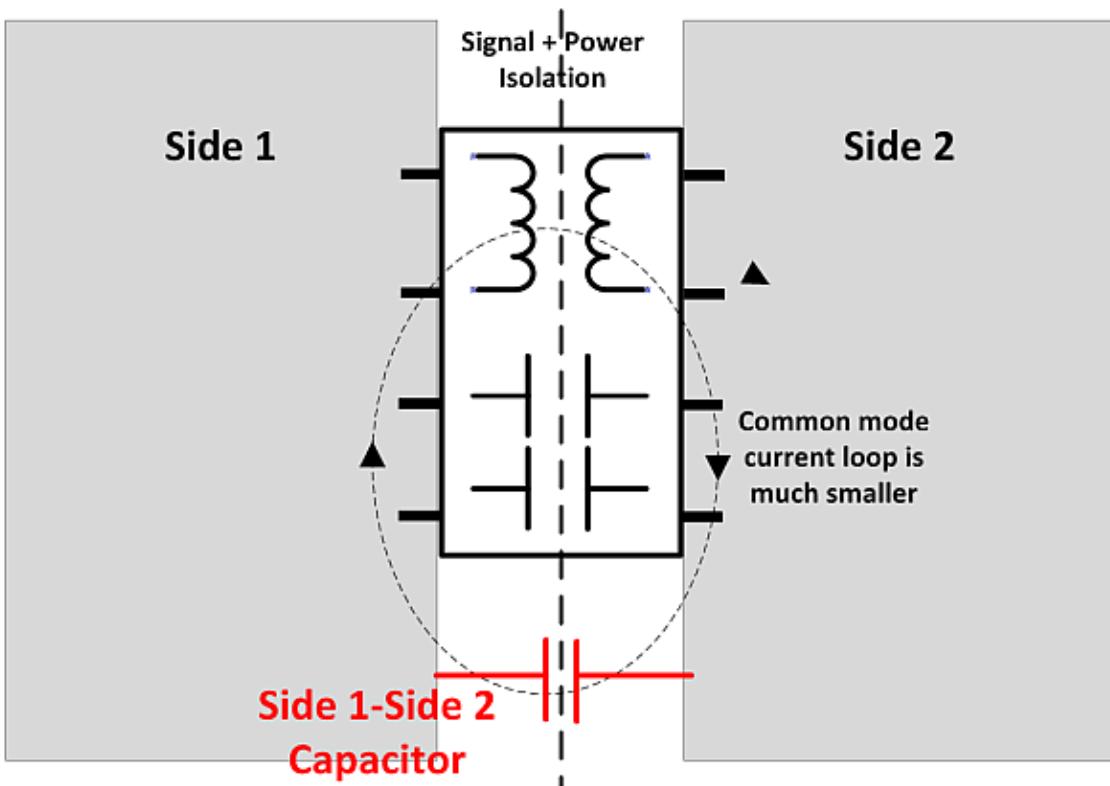
A zavarkibcsojtás mérése során elsősorban a vezetett és sugárzott zavarokat különböztetjük meg.

TODO klik rát, meg minden

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 bemenetei vannak, ezek pedig RC tagokkal csatlakoznak az analóg-digitális konverterekhez.

A sugárzott zavarkibocsájtást nagy valószínűséggel a 180MHz-en működő iCoupler alapú integrált tág leválasztók dominálják az ADE7933-akban, ezek a kritikus alkatrészek. Ahhoz, hogy egy apró tokozású, néhány mm-es alkatrészen belül tátót tudjanak leválasztani, a légmagos transzformátort 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 tranzisztora a szekunder oldalon közösmódusú 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 kodnenzátorok 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,



**4.3. ábra.** *Emisszió csökkentése integrált izolált táp esetén*

így a mi alkalmazásunkban, földelt C-RTU rendszer esetén N-PE közé kerül. A tényleges megvalósítás esetén szembekerülhetünk azzal a problémával, hogy a választott nagyfeszült-ségű 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.



**4.4. ábra.** *Emisszió csökkentésének tényleges megvalósítása*

TODO CITÁCIÓ! + a képre is!

#### 4.1.3. 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.

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

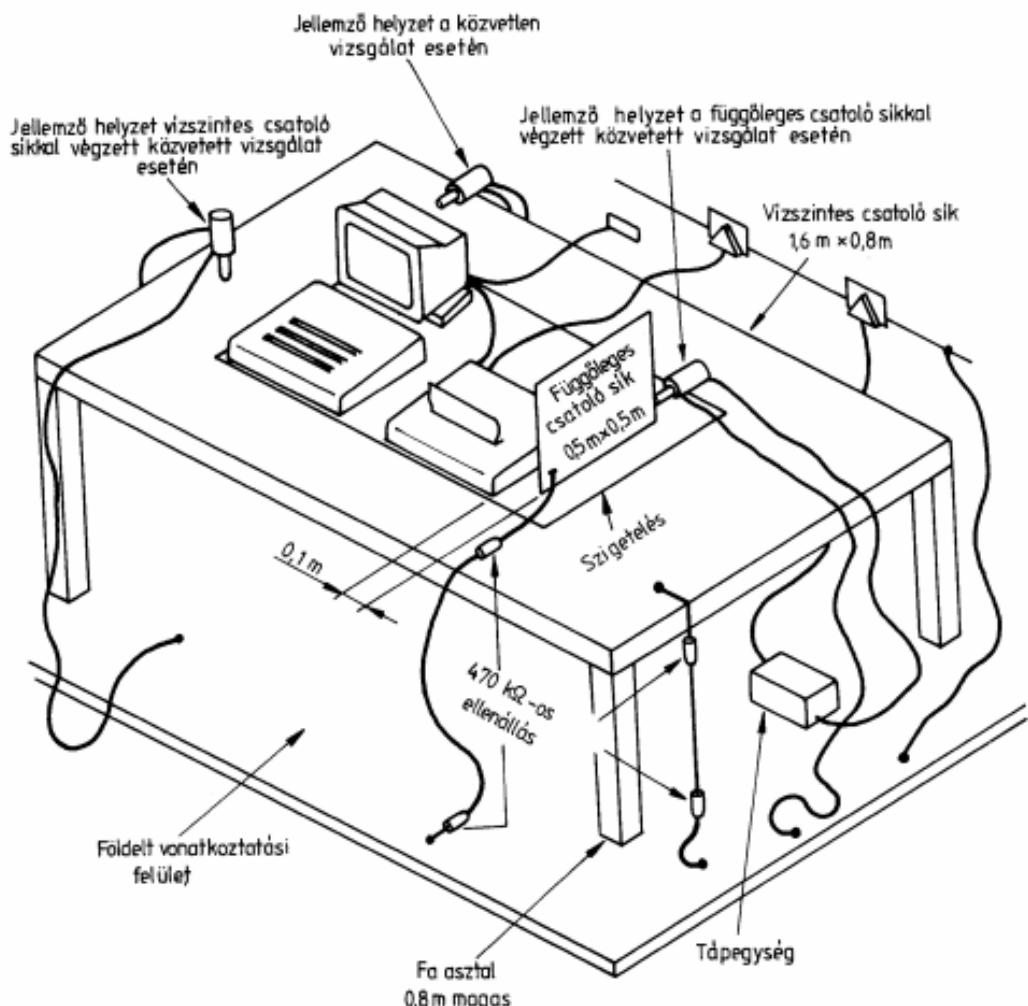
Mivel a CR-PM3 semmilyen vezető felülete nem érinthető a felhasználó által, így nem szükséges a közvetlen kisülést vizsgálni, elég csupán a közvetett esetet nézni, amikor egy horizontális és vertikális csatolósíkkal juttatjuk be a zavarokat a rendszerbe.

Erre a tesztre az 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 következetesre jutottunk több kollégámmal, hogy az áramkört mindenkorral legalább 4 rétegű NYÁK-ra kell tervezni a javított zavarvédelem érdekében.

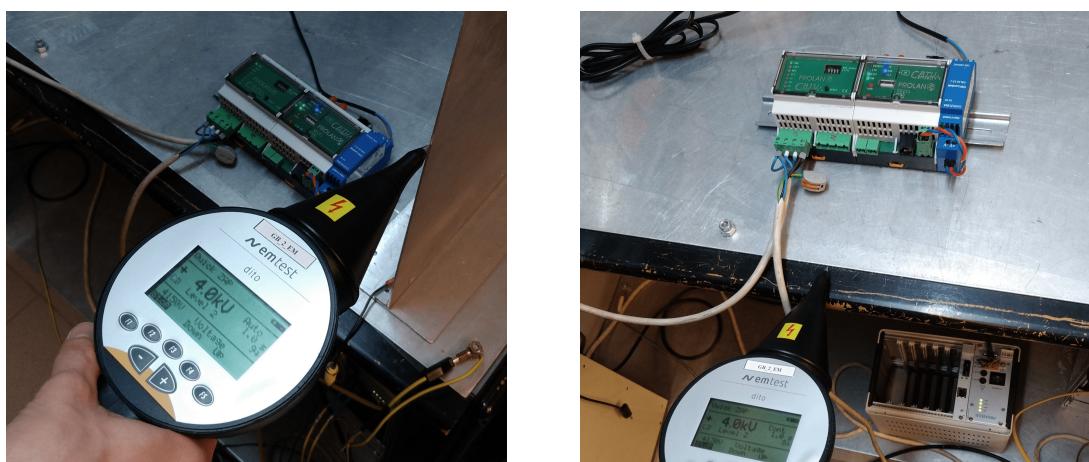
#### Burst (IEC 61000-4-4)

A méréshez a közvetlen söntös elrendezést alkalmaztuk, mivel így valószínűleg nagyobb zavar jut a mérőhöz, mint egy áramváltó transzformátoron keresztüli bekötés esetén. A terhelés egy elektromos fűtőtest volt, amivel az áramcsatornán nagyjából a mérési tartomány közepére jutó terhelés alakult ki.

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



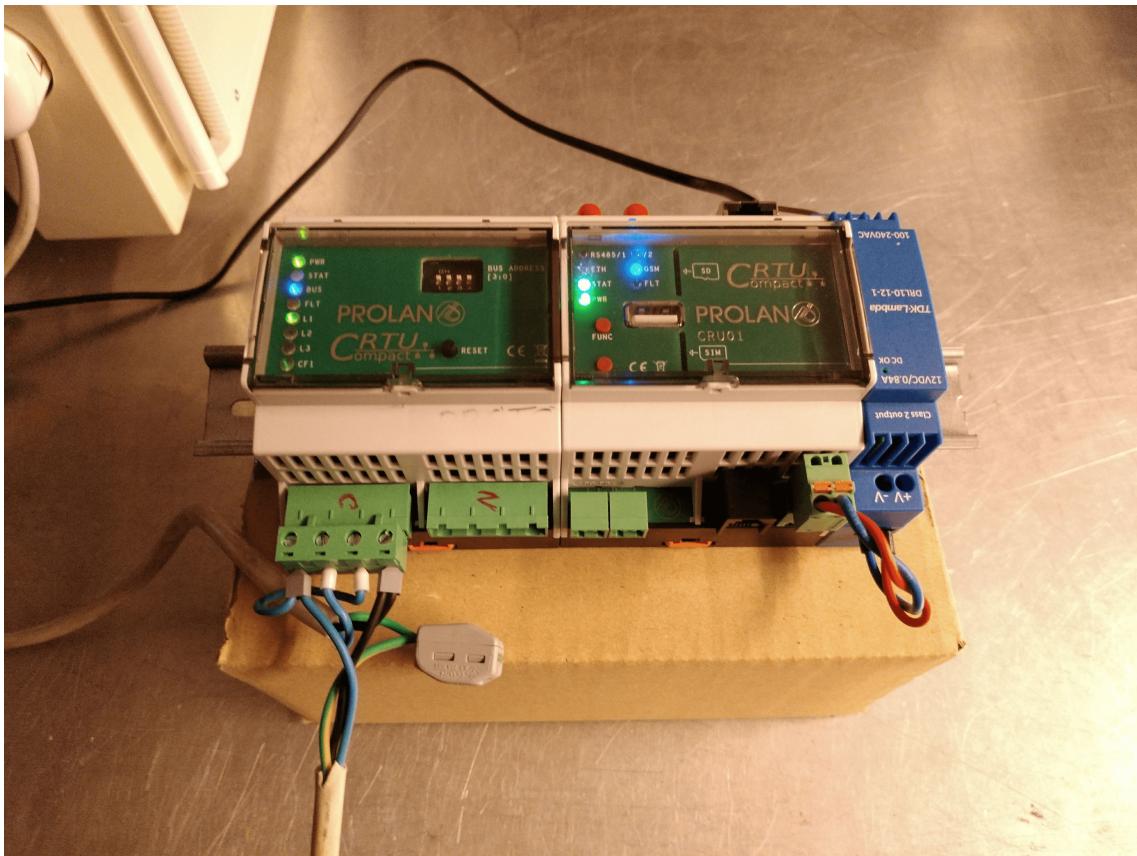
4.5. ábra. ESD mérési összeállítás



4.6. ábra. ESD teszt csatoló síkokkal

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

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



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

A méréshez a szabvány 1/min minimális frekvenciát ír elő, mivel a lehetséges védelemek (pl. varisztor) tulajdonságai melegedés hatására megváltozhannak. 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 párosztázta végig a frekvenciatartományt.

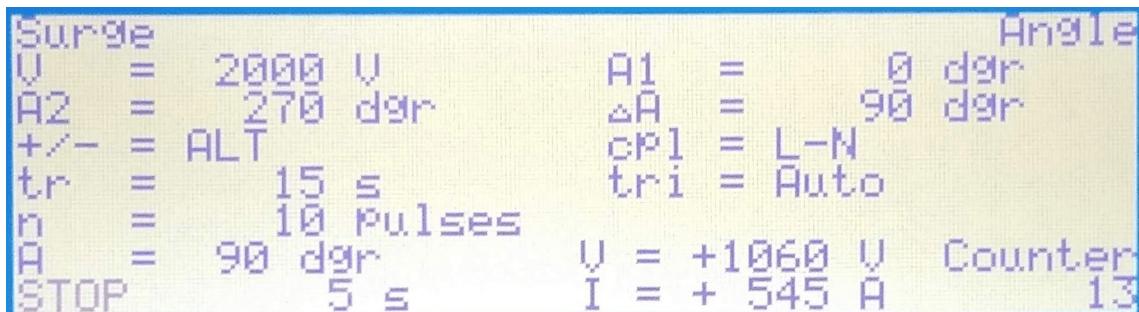
##### 4.1.4. Javítási tervek

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

1. *Rétegszám növelése:* Kétségekívül a legfontosabb módosítás legalább két további réteg felvétele, amelyek egybefüggő földkitöltést, illetve tápfzigszákat tartalmaznak. Ezek a



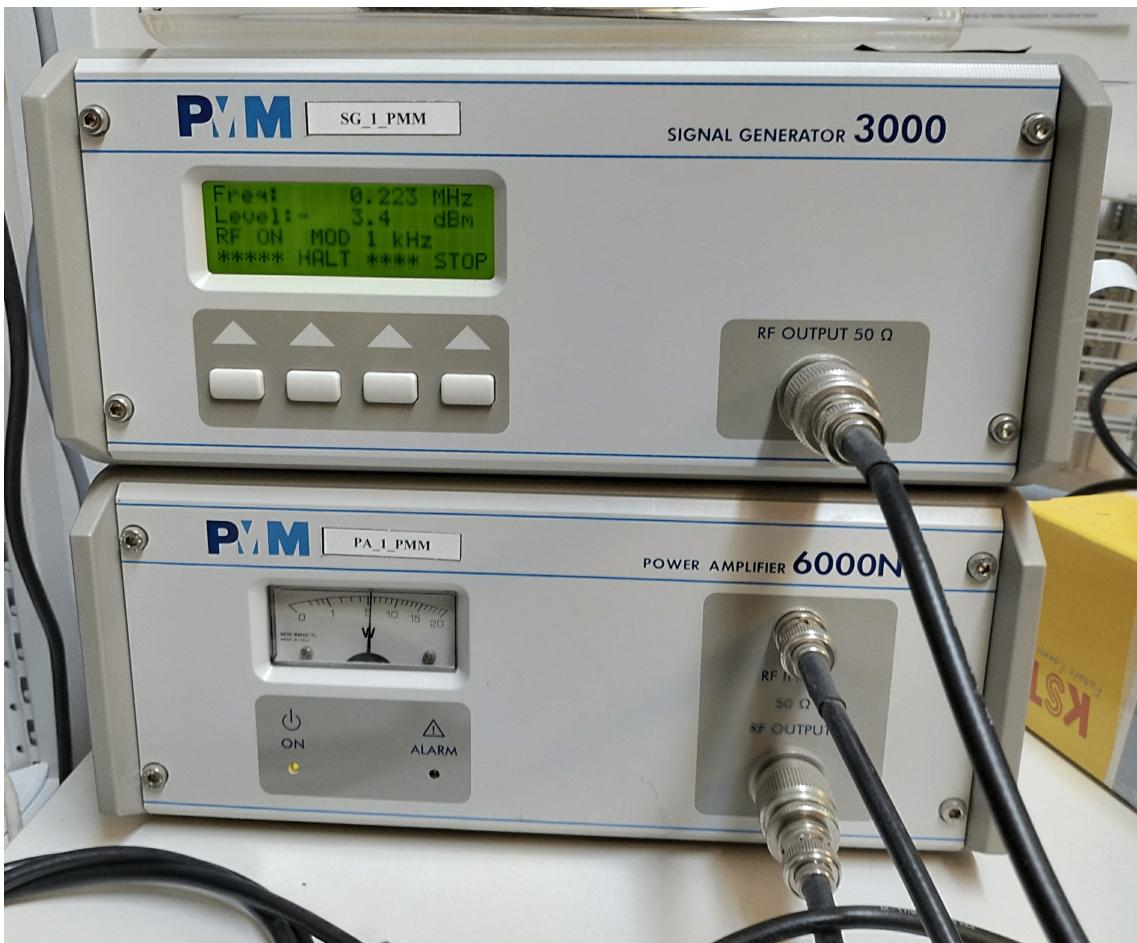
4.8. ábra. Szimulátor beállításai burst teszthez



4.9. ábra. Szimulátor beállításai surge teszthez

visszaáramok szempontjából alacsony impedanciás utat biztosítanak, tág 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 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



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

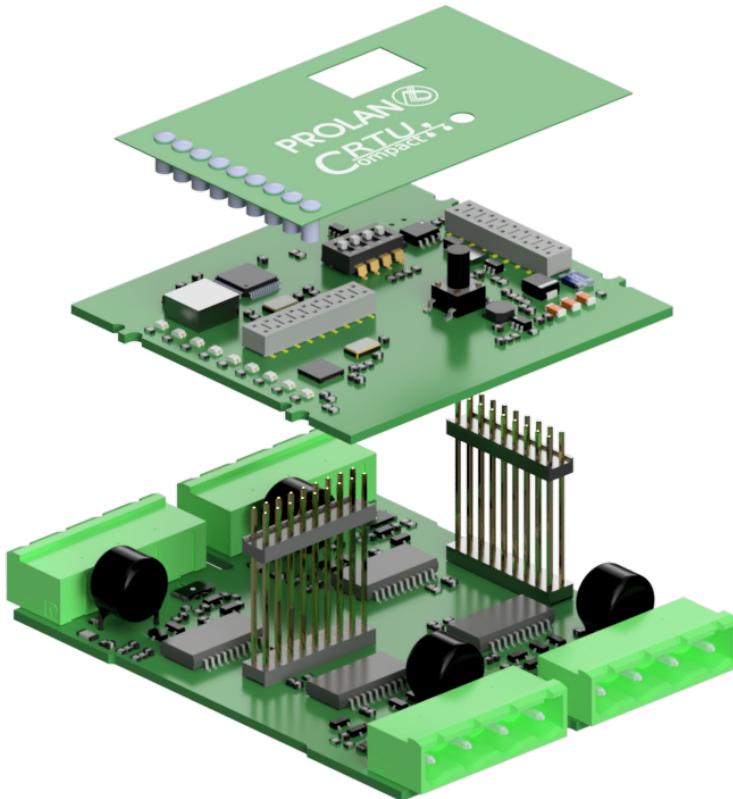
az alsó NYÁK-ra, így az ADE7978 és mikrokontroller közötti SPI, reset, interrupt és táp vonalakat kell csak átvinni.

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-kibocsátáshoz 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.

## 4.2. Mechanika

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

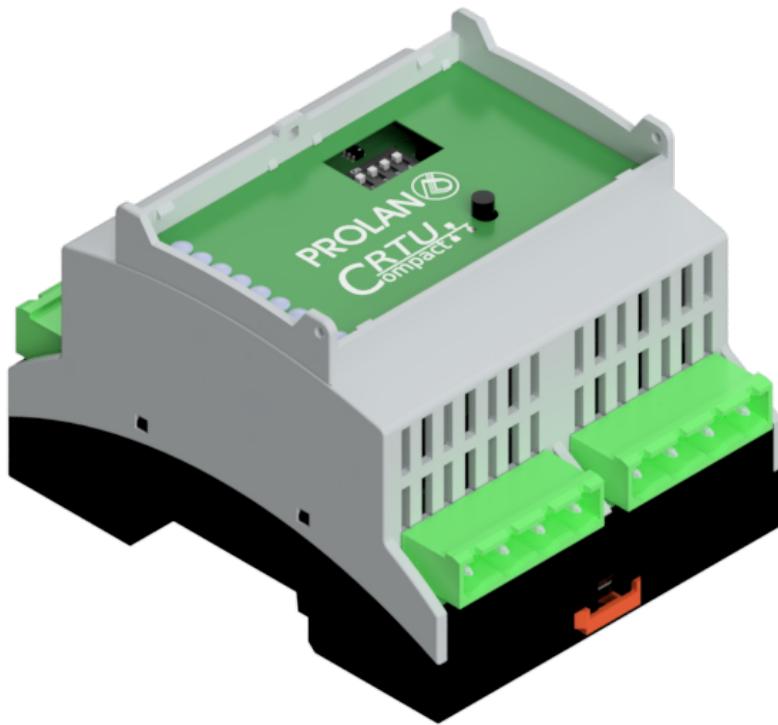
1. *CR-PM3A*: A "front-end"-et valósítja meg, itt kapott helyet a 4 darab ADE7933 izolált mérő IC, az ezekhez kapcsolódó elektronika, valamint a KIF csatlakozók.
2. *CR-PM3C*: A mikrokontroller, illetve az ADE7978 égetett kódú DSP helyezkedik el ezen a szinten.
3. *CR-PM3P*: Elektronikai funkciót nem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



**4.11. ábra.** *CR-PM3 összeállítása*

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

A két elektronikát tartalmazó emelet közötti kapcsolatot a Samtec által gyártott speciális, DW családba tartozó tűsorával, és HLE családba tartozó hüvelysorával 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 hüvelysor pedig egy "Pass-through" típusú csatlakozó, vagyis akár



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

alulról, akár felülről is képes fogadni az ellenpárrját. 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.

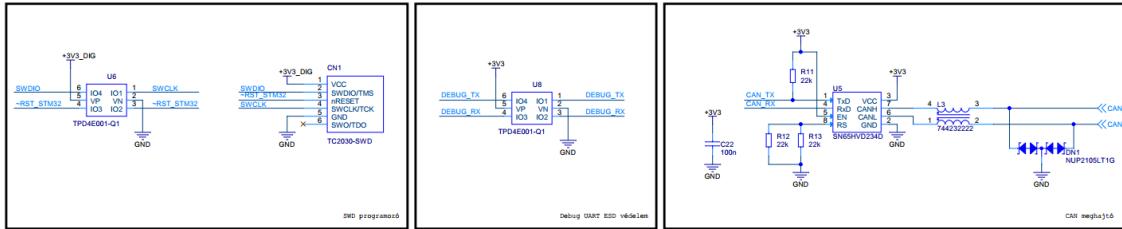
Az előlapon a C-RTU család minden tagján kötelező bizonyos állapotokat LED-del megjeleníteni. A tervezés fázisában a tényleges megvalósításra nem volt teljes előírás, ezért a modulon egy addig nem használt megvalósítást próbálhattam ki. SMD LED-eket helyeztem el a CR-PM3C-n, majd a CR-PM3P előlapjai NYÁK-ra 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.

### 4.3. Kapcsolási rajz

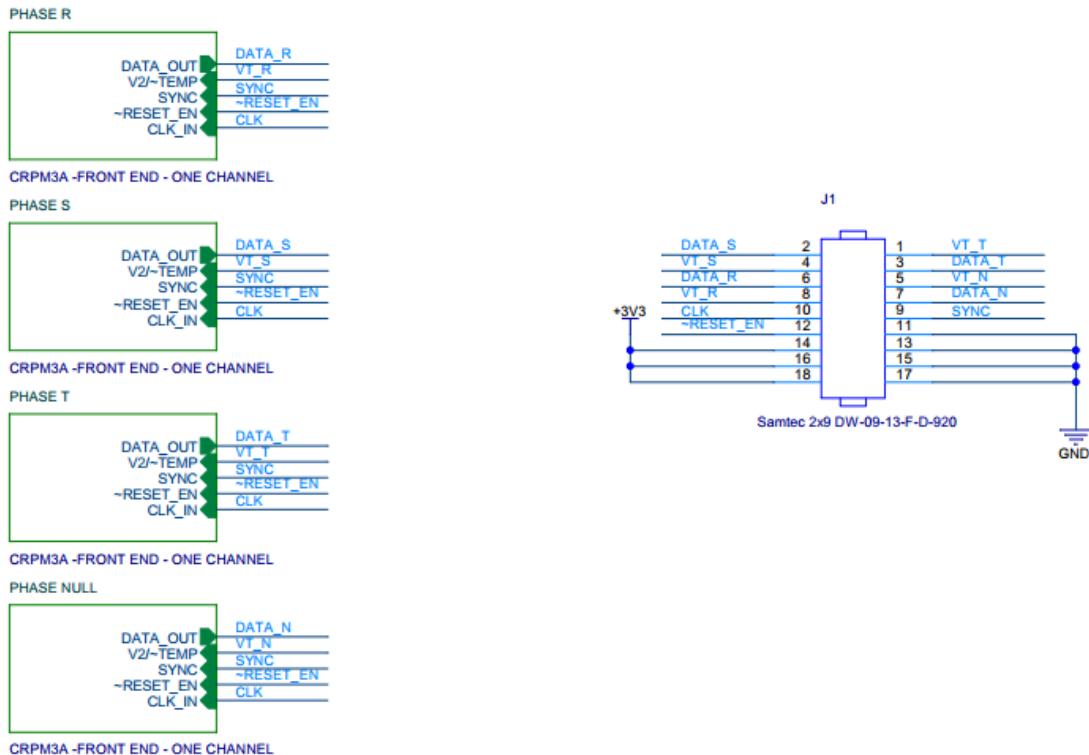
A kapcsolási rajzot OrCAD Capture-ben hoztam létre, melynek számos funkciója segíti a tervező mérnökök, illetve a gyártás előkészítés munkatársainak közös munkáját. A tervező az alkatrész lehelyezésekor láthatja, hogy az adott komponensből hány darab van raktáron, mennyi annak a beszerzési ára, így elkerülhetők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

beszerezhető, vagy feleslegesen drága alternatíva kerül egy új termékbe.

A kapcsolási rajzok készítése során bizonyos formázási kérdések a fejlesztőre vannak bízva. Az átláthatóság érdekében én ahol csak lehet a hierarchikus felépítést, illetve a lapokon belüli további, az értelmezést segítő felbontást preferálom.



**4.13. ábra.** Lapon belüli felbontás



**4.14. ábra.** Hierarchikus tervezés

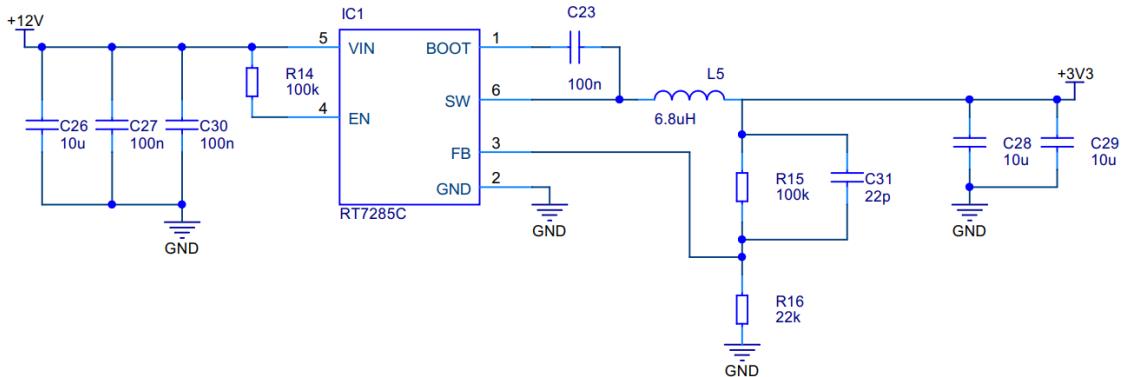
A CR-PM3C-n egy 3.3V-os tápegységet és a hátlapi buszfeszültség visszaolvasását leszármítva tisztán digitális áramkörök helyezkednek el. Ezen a NYÁK-on a főbb komponensek:

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: státusz, 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 működéséhez szükséges alkatrészek.
5. *DSP*: Az ADE7978-as égetett kódú DSP.
6. *CAN meghajtás*
7. *Reset/PPS áramkör*: Ugyanazon a hátlapi két vonalon egy differenciális PPS jel van, amelynek a megszűnése egy rövid időn belül működteti a reset áramkört.
8. *Reset gomb*: Rövid idejű nyomvatartása után a reset áramkort működésbe lép.
9. *Debug UART csatlakozó*: A fejlesztéshez használandó, ESD védelemmel van ellátva.
10. *Programozó csatlakozó*: Ez egy Tag-Connect csatlakozó, ami gyakorlatilag tisztán NYÁK rajzolattal kialakítható, nem szükséges alkatrészt beültetni hozzá.
11. *Busz és emelet csatlakozók*: Samtec "Pass-Through" keresztülmenő hüvelysorok.

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 sötök, a nagyfeszültségű ellenállás osztók és a KIF csatlakozók találhatók.

#### 4.3.1. Kapcsolóüzemű tápegység



**4.15. ábra.** RT7285/A alapú 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 alkatrészszükségnye miatt.

Az IC fontosabb jellemzői a TODOTODOTODO táblázatban láthatóak.

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

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...85C°
Tokozás	SOT-23-6

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

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 tranziszor választát 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:

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

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 10μ-os kondenzátort az alacsonyabb frekvenciás szűrésre.

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

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

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

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

Természetesen ezek a képletek csak folytonos üzemre igazak, szaggatott üzemben a feszültséghullámosságot teljesen más, bonyolultabb képletekkel lehet számolni, azonban attól most tekintsünk el. Kis méretű SMD kerámia kondenzátorok tipikus ESR-je 10mΩ alatti, így én a legrosszabb esetet tekintve 10mΩ-mal számolok. A kimeneti kapacitást első körben vegyük 20μF-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 csökkeni fog a feszültséghullámosság.

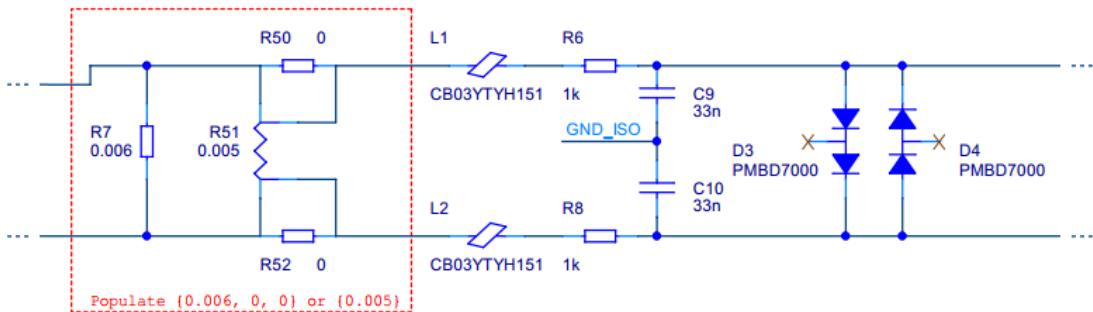
$$V_{RIPPLE(ESR)} = 0.75A * 0.010\Omega = 7.5mV$$

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

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

Ezt a maximális feszültséghullámosságot minden rendszerben lévő eszköz probléma nélkül el fogja viselni.

#### 4.3.2. Bemeneti áramkör - Áram bemenet



**4.16. 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 alkalma-zások lehetőségét.

Áramváltó transzformátoros megoldás esetén a kis értékű sönt használata miatt egy lebegő áramforrásként tekinthetünk a bemeneti jelforrásra, amely a mérősöntön 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 opción került kialakításra: Egy ki-sebb precizitású, 1%-os  $6\text{m}\Omega$ -os két vezetékes ellenállás, mely olcsóbb, illetve egy 0.1%-os  $5\text{m}\Omega$ -os, négy vezetékes sönt, mely nagyobb költségű. A jövőben elkövethető, hogy ez az opcionális ültetés kikerül a termékből, azonban egy prototípus tervezésénél minél több lehe-tőséget 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.

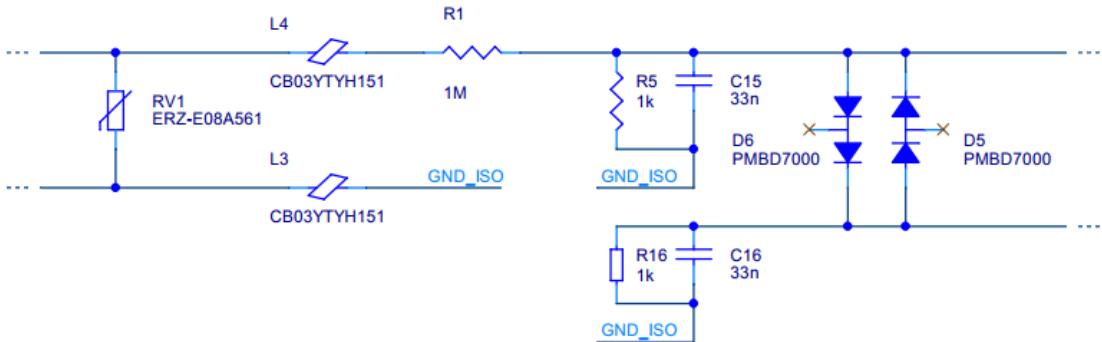
Az RC aluláteresztő tervezett töréspontja

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

, ez 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 sávszé-lessége felett van.

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  $t_{rr} \leq 4\text{ns}$ , ezek pedig a bemeneten található RC szűrőkkel megfelelő vé-delmet biztosítanak az esetleges sztatikus kisülések, rövid, kis energiájú feszültségtüskék ellen.

#### 4.3.3. Bemeneti áramkör - Feszültség bemenet



**4.17. 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.

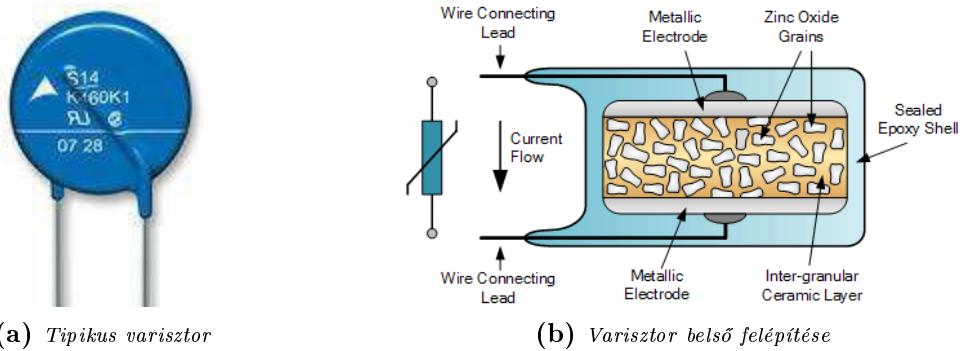
**TODO ESETLEG KÉPLET ITT LENTEBBIT SZÁMOLNI**

A hálózati feszültség mérésitartományra való transzformálását egy egyszerű ellenállásosztó biztosítja, melyben 0.1%-os precizitású alkatrészeket használtam. Ez az ADE7933  $\pm 0.5$ V-os névleges bemenetitartományra a  $\pm 500.5$ V-ot képezi, ami effektív feszültségben 353.9VAC, így megfelelő tartalékkal tudjuk mérni a névleges 230VAC hálózatokat.

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. Ezen zavarok ellen túlfeszültség védelmet kell implementálni:

**TODO CITÁCIÓ KÉSZÜLKÖTERVEZÉS JEGYZETRE BME AUT**

1. *Szikraköz* A túlfeszültség védelmek közül ez a legegyszerűbb, itt az átütés jelenségét használjuk fel védelmi célokra, amelynek kritikus feszültsége viszont a környezeti körfülvényektől erősen függ. A szikraközöt mindenkorábban áramkorlátozó eszközzel (Kismegszakító, olvadóbiztosító) együtt kell alkalmazni, anélkül még nagyon kis áramok esetén is megmaradhat az ív, az pedig tűzveszélyes.
2. *Nemesgáz töltésű szikraköz (GDT)* A szikraközökhez hasonló, azonban itt egy hermetikusan lezárt eszközben alakul ki a kontrollált ív, amely biztonságosabb működést eredményez.
3. *Fémoxid varisztor* Egy neilineáris ellenállásként viselkedő eszköz, mely a szikraköznel ellentétben a túlfeszültség megszűnésekor, amennyiben a varisztor nem hibásodott meg, normál működésbe tér vissza, csak szivárgási árama lesz.



**4.18. ábra.** A varisztor

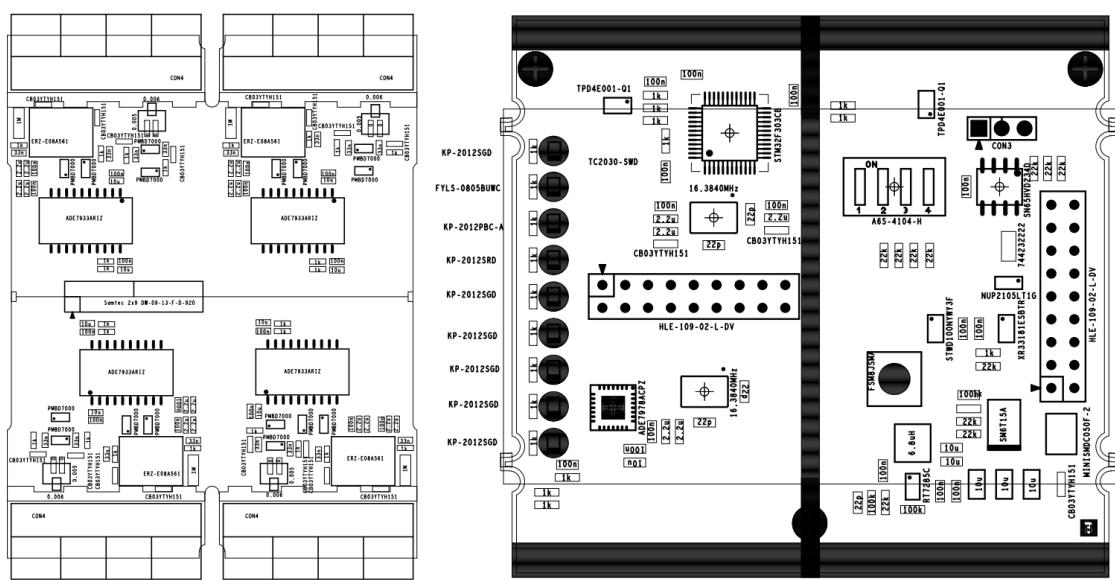
4. *Transient voltage suppressor* Hasonló karakteristikájú egy Zéner diódához, gyors nyitási idővel, azonban kisebb szivárgási árammal, nagyobb impulzus teljesítménnyel. Hosszabb idejű túlfeszültség korlátozására alkalmatlan.
5. *Tirisztoros vágó áramkör* Ez egy gyors működésű védelem, azonban gondoskodni kell a zárlati áram megszakításáról. A túlfeszültség és áramkorlátozás megszüntetése után az áramkör alapállapotba kerül. Hátránya, hogy rövid idejű feszültségtüske esetén feleslegesen korlátozhatja a kimenetén a feszültséget.

TODO Todo citáció, innen a képek:

#### 4.4. NYÁK terv

A nyomtatott áramköri terveket Allegro PCB Designer-ben valósítottam meg, költséghatékonyági szempontból 2 rétegen. Fontos feladat a tervezés során figyelembe venni 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 felvettettem 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, kvarcok 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-esetén. A terveket sikeresen elértem a szerelelésre előkészítéssel, ezzel csökkentve a modul gyártási költségét.



**4.19. ábra.** *CR-PM3A* és *CR-PM3C*

## 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. Ezek leggyakrabban külső flash, vagy EEPROM típusúak, újabban pedig már az MRAM magneto-rezisztív adattárolók szerepe is növekszik. Ezek a nem felejtő memóriák viszonylag alacsony plusz költséget jelentenek, a hely igényük a nyomtatott áramkörön  $1\text{cm}^2$  alatti, ez 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 mindenkorral minden definiált konstans értékét kell megadni, majd néhány függvény használatával egyszerűen írni és olvasni a 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

Jellemző	Külső EEPROM	Emulált EEPROM
Írási idő	20ms	244µs...82ms
Törlési idő	5ms/bájt	20...40ms/page
Olvasási idő	92µs	10...300µs
Írási/Törlési ciklus szám	1 millió	10 ezer/page

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

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 legvégeire 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:

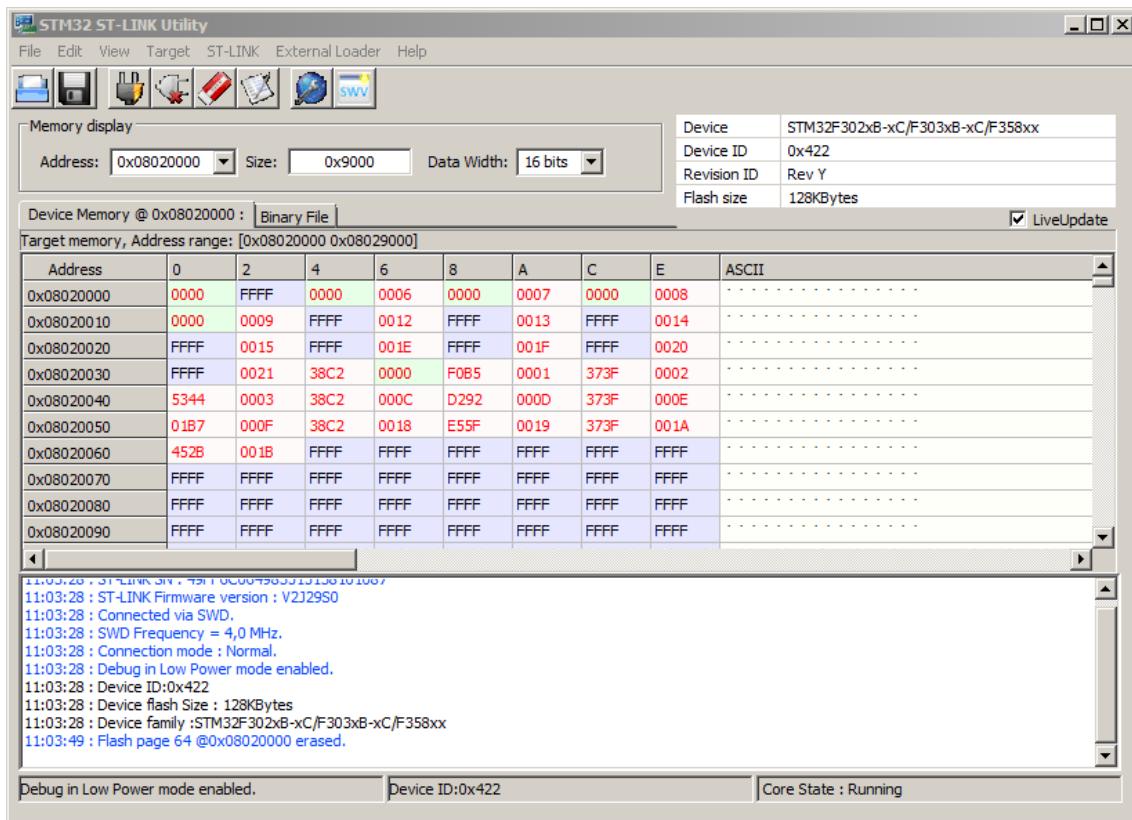
```

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



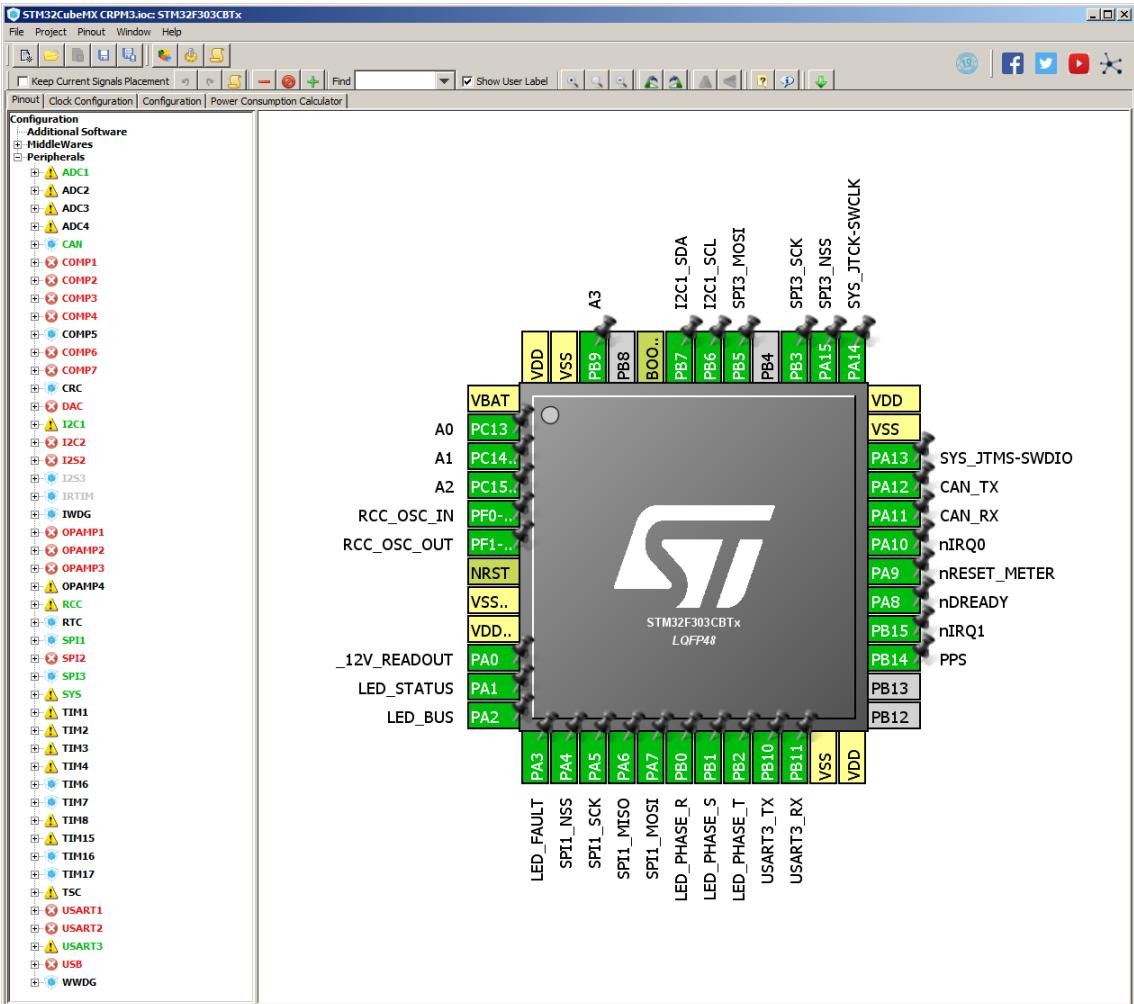
**5.1. ábra.** *STM32 ST-LINK Utility LiveUpdate opciónal*

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);           45
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 GPIO, Timer, SPI, DMA, ADC és NVIC perifériák vannak használatban a feladatok ellátására.

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.

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

1. *tickHandler1000()*: Elsősorban debug funkciók megvalósítására volt használva, a különböző gyors események láthatóvá tételehez, például, hogy valamelyen 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 nullvezető figyelő bemenetre nem használható a nullátmennet 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 kiolasztott 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 beemeneten 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 mérőmennyiségek változókat, a mérési módjukat:

1. *tag*: Egy konstans string, amely az emberi olvasásra alkalmas nevét tartalmazza a regiszterek, így debug célokra kiváló.
2. *value*: Az átlagolt értéke a regiszterek.
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 mérőmennyiséget 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.

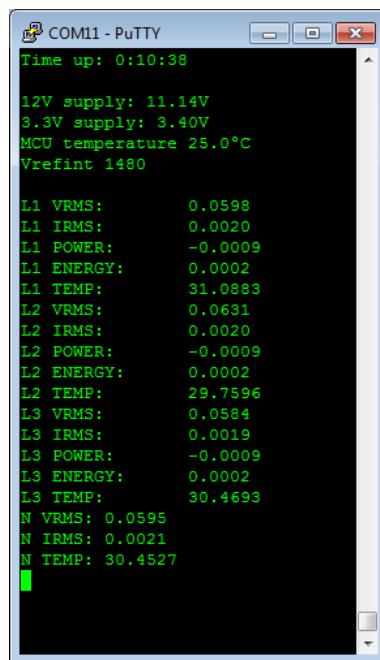
```

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.



**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 paraméterezőt viszonylag kevés munkával, egy SQL adatbázis .....

The screenshot shows a web browser window titled 'CRTU-B Web' with the URL '10.63.255.4'. The page has a green header with the 'C-RTU Web' logo and a navigation menu on the left containing 'C-CAN Modulok', 'Adatok' (selected), 'Tulajdonságok', 'Paraméterek', 'Processzek', and 'Élő kapcsolat' (status ONLINE). The main content area is titled 'Adatok' and displays a table with 29 rows of measurement data. The columns are: Id, Tipus, Név, Érték, Keletkezési idő, Beérkezési idő, and Státusz. The data includes various parameters like L1/L2 fázis hőmérséklet, feszültség, áram, teljesítmény, energia, és nullvezető értékek. All data is timestamped at 2016.11.03 20:11:33, and the status column shows 0x00000000 for all entries.

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 20:11:33	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	0.00203808 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

#### 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 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,

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

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 kimenetei minden össze az előlapon 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:

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.	Hosszú kimaradások ideje évente . . . . .	8
2.1.	C-RTU család . . . . .	9
2.2.	C-RTU alapkészülék . . . . .	10
3.1.	Lineáris optocsatolós analóg jel leválasztás . . . . .	14
3.2.	Áramváltó transzformátor működési elve . . . . .	15
3.3.	Rendszer felépítése . . . . .	18
3.4.	Áramváltó nélküli mérési elrendezés . . . . .	19
4.1.	Szigeteléskoordináció IEC 60664 alapján . . . . .	22
4.2.	EMC vizsgálatok osztályzása . . . . .	23
4.3.	Emisszió csökkentése integrált izolált táp esetén . . . . .	25
4.4.	Emisszió csökkentésének tényleges megvalósítása . . . . .	25
4.5.	ESD mérési összeállítás . . . . .	27
4.6.	ESD teszt csatoló síkokkal . . . . .	27
4.7.	Burst és surge teszt mérési összeállítása . . . . .	28
4.8.	Szimulátor beállításai burst teszthez . . . . .	29
4.9.	Szimulátor beállításai surge teszthez . . . . .	29
4.10.	Vezetett RF zavarok mérési összeállítása . . . . .	30
4.11.	CR-PM3 összeállítása . . . . .	31
4.12.	CR-PM3 a készülékházban . . . . .	32
4.13.	Lapon belüli felbontás . . . . .	33
4.14.	Hierarchikus tervezés . . . . .	33
4.15.	RT7285/A alapú kapcsolóüzemű tápegység . . . . .	34
4.16.	Az áramméréshez tartozó bemeneti áramkör . . . . .	37
4.17.	A feszültségméréshez tartozó bemeneti áramkör . . . . .	38
4.18.	A varisztor . . . . .	39
4.19.	CR-PM3A és CR-PM3C . . . . .	40
5.1.	STM32 ST-LINK Utility LiveUpdate opcióval . . . . .	44
5.2.	STM32CubeMX konfigurációs felülete . . . . .	45
5.3.	Debug soros port kimenete . . . . .	50
5.4.	CR-WEB fejlesztői felület . . . . .	51

# Táblázatok jegyzéke

3.1.	AF500 ProField modul specifikációja . . . . .	12
3.2.	16451-es áramváltó transzformátor pontossága terhelés függvényében . . . . .	18
3.3.	ADE7978 tipikus pontossági értékei 0.1%-os alkatrészek alkatrészek alkal-mazásával . . . . .	20
4.1.	RT7285/A fontosabb jellemzői . . . . .	35
5.1.	EEPROM és emulált EEPROM összehasonlítása 32 bites adatokon . . . . .	42
5.2.	Omicron CMC 356 specifikációja háromfázisú konfigurációban . . . . .	52

# 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, 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, 2003.
- [3] CEER 6th Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply. Jelentés, Council of European Energy Regulators (CEER), 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, 2007.
- [6] Elektromágneses összeférhetőség. Háztartási készülékek, villamos szerszámok és hasonló eszközök követelményei. 1. rész: Zavarkibocsátás (CISPR 14-1:2005). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 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, 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, 2011.
- [9] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 4-5. rész: Vizsgálati és mérési módszerek. Lököhullámmal szembeni zavartűrési vizsgálat (IEC 61000-4-5:2014). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 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, 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, 2018.
- [13] AN4056, EEPROM emulation in STM32F30x/STM32F31x/STM32F37x/STM32F38x microcontrollers. Application note, STMicroelectronics, 2012.
- [14] UM1718, STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation. User manual, STMicroelectronics, 2018.
- [15] DS9118, STM32F303xB STM32F303xC datasheet. Datasheet, STMicroelectronics, 2018.
- [16] ADE7978/ADE7933/ADE7932/ADE7923. Datasheet, Analog Devices, November 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, 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/>.

# Függelék

## F.1. Függelék 1

TODO