



DIPLOMATERVEZÉSI FELADAT

Sárközy Balázs
Villamosmérnök hallgató részére

Háromfázisú mérőrendszer villamos hálózati jellemzők vizsgálatához

A minőségi villamos energia ellátáshoz feltétlenül szükséges a feszültségminőségi paraméterek pontos definiálása, valamint azok méréssel történő ellenőrzése. Ennek elvégzéséhez állandó mérésekre van szükség, melyeket kihelyezett, környezeti hatásoknak ellenálló adatgyűjtőkkel valósítanak meg.

A hallgató feladata egy olyan mérőrendszer megtervezése, megvalósítása, mely képes a három fázis és a nullvezető feszültségének és áramának mérésére, ezekből pedig kiszámítani a vonali feszültségeket, fázisszögeket, frekvenciát, hatásos és meddő teljesítményt. A mért értékeket legalább másodpercenként elő kell állítani.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- Ismerje meg a lehetséges mérési és számítási módszereket.
- Tervezze meg a mérőrendszer blokkvázlatát és kapcsolási rajzát!
- Mértezze a kapcsolást!
- Tervezze meg a nyomtatott áramköröket a készülékhez!
- Készítse el a műszer beágyazott szoftverét!
- Készítse el a fogadó oldali szoftvert!
- Mérésekkel igazolja a készülék helyes működését!

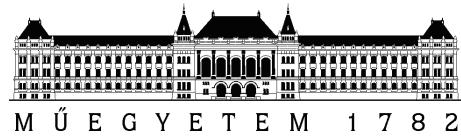
Tanszéki konzulens: Kökényesi Tamás

Külső konzulens: Buday Csaba (Prolan Irányítástechnikai Zrt.)

Budapest, 2018. március 7.

Dr. Charaf Hassan
egyetemi tanár
tanszékvezető





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

Kivonat	5
Abstract	6
Bevezető	7
1. Energetikai áttekintés	8
1.1. Teljesítményminőség	8
1.1.1. Teljesítményminőség összetevői	9
1.1.2. MSZ EN 61000-4-30 követelményei	11
1.2. CEER Benchmarking	12
2. C-RTU család	14
2.1. Alapkészülék	15
2.2. Kiegészítő modulok	15
2.2.1. Egységes funkciók	15
2.3. C-CAN protokoll	17
2.4. Mechanikai kialakítás	17
3. Rendszer jellemzők	18
3.1. Specifikáció	18
3.2. Feszültségmérés	19
3.2.1. Feszültségváltó transzformátor	19
3.2.2. Ellenállásosztó és izolációs erősítő	19
3.2.3. Ellenállásosztó és leválasztott ADC	20
3.2.4. Feszültségmérési megoldások összehasonlítása	20
3.3. Árammérés	20
3.3.1. Áramváltó transzformátor	21
3.3.2. Rogowski-tekercs	22
3.3.3. Sönt ellenállás és izolációs erősítő	22
3.3.4. Hall-szenzoros árammérő	22
3.3.5. Árammérési megoldások összehasonlítása	23
3.4. Adatfeldolgozás	24
3.4.1. Mikrokontroller	24

3.4.2. Digitális Jelfeldolgozó Processzor	25
3.4.3. Programozható Logika	25
3.4.4. Mérő IC, beégetett DSP kóddal	25
3.5. Választott megoldás	25
3.5.1. Elméleti specifikáció, funkcionalitás	27
4. Hardver konstrukció	29
4.1. Követelmények	29
4.2. Kapcsolási rajz	30
4.2.1. Kapcsolóüzemű tápegység	31
4.2.2. MCU és környezete	33
4.2.3. Bemeneti áramkör - Áram bemenet	33
4.2.4. Bemeneti áramkör - Feszültség bemenet	35
4.3. NYÁK terv	37
4.3.1. Tápegység NYÁK terve	37
4.3.2. Mérő bemenetek kialakítása	38
4.4. Szabványosság	39
4.4.1. Szigeteléskoordináció	39
4.4.2. EMC	41
4.4.3. EMC tesztek	45
4.4.4. Javítási tervezet	48
4.5. Mechanika	48
5. Szoftveres komponensek	51
5.1. Mikrokontroller	51
5.2. Emulált EEPROM	51
5.3. Firmware	53
5.3.1. Program felépítése	53
5.3.2. Mérő IC-t kezelő függvények, struktúrák	56
5.3.3. Debug UART	58
5.4. CR-WEB	58
5.5. Gyártás támogatás	60
5.5.1. Végmérés és kalibráció	60
6. Példaalkalmazás	64
Összefoglalás	67
Köszönetnyilvánítás	68
Ábrák jegyzéke	70
Táblázatok jegyzéke	71
Irodalomjegyzék	74

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 15.

Sárközy Balázs
hallgató

Kivonat

Diplomamunkám keretében egy olyan háromfázisú teljesítményminőség mérőmodul fejlesztését mutatom be, amely munkahelyem, a PROLAN Irányítástechnikai Zrt. által fejlesztett C-RTU családjába illeszkedik. A család moduljaival kisméretű, moduláris, alacsony költségű rendszerek alakíthatóak ki, így a tervezendő készüléknél kiemelten fontos volt a minél kisebb és költséghatékonyabb kialakítás, a mérések pontossága.

Először a feszültségminőség, illetve teljesítményminőség fogalmát ismertetem, az ehhez tartozó szabványokkal, mérési kritériumokkal, hálózati eseményekkel. Bemutatom a fejlesztési irányokat, kiemelve a jelenleg is épülő "Okos hálózatot", amely a modern, egyre nagyobb számítási teljesítményű, elektronikák fejlődésének eredményeképp jöhet létre.

Ezt követően a PROLAN Zrt. C-RTU családját mutatom be, az ezzel megvalósított rendszerek előnyeit, sajátosságait. Ezután a rendszer elemeit, a Linux-ot futtató alapkészüléket és annak képességeit, valamint a kiegészítő modulokat és azoknak a jelenlegi tagjait, valamint a közös jellemzőiket, megoldásait, funkcióikat tárgyalom.

A tervezés első lépéseként bemutatom a PROLAN Zrt. egy másik termékcsaládját, a ProField-et, illetve ennek egy háromfázisú feszültség- és árammérőmodulját, az AF500-at, majd ennek a specifikációját veszem kiindulási alapnak. A rendszer tervezése során ismertetem a különböző feszültség- és árammérési, valamint adatfeldolgozási megoldásokat, majd összehasonlítás után ismertetem a rendszertervét a mérőmodulnak.

A hardverterek elkészítésének lépései részletesen mutatom be, kitérve az alkatrészválasztásokra és méretezésekre, kapcsolási rajzok és NYÁK tervek elkészültére. Külön figyelmet fordítok a mechanikai tervek bemutatására a készülék speciális kialakítása miatt.

A szoftveres komponenseit a modulnak a beágyazott szoftverben alkalmazott megoldások szemléltetésével kezdem, bemutatva a speciális struktúrákat, függvényeket amelyek speciálisan a modulhoz tartoznak. Szemléltetem, hogy a már megírt, C-RTU család specifikus szoftveres rétegét hogyan kell használni, a különböző, már megírt funkciókat hogyan érhetjük el. A fogadó oldali megjelenítést, annak egyszerű konfigurálását, valamint a kalibráció egyes lépéseit példákon keresztül mutatom be.

Végezetül egy tényleges példaalkalmazást mutatok be, ezzel szemléltetve a rendszer, azon belül pedig a teljesítményminőség mérőmodul képességeit.

Abstract

In my master's thesis I present the development of a three-phase power quality measuring module, that belongs to the C-RTU product family developed by PROLAN Zrt. Using this family yields in small, modular, low-cost solutions, so the device to be developed had to be compact, cost-effective, without compromising accuracy.

First, I describe the concept of voltage and power quality, mentioning the relevant standards, measurement criteria and power events. I present the development trends in power delivery systems, highlighting the "Smart Network" concept, and the role of high performance electronics in it's evolution.

I introduce the C-RTU product family made by PROLAN Zrt., the advantages and special functions of the system, then I discuss the elements of the system, the base module, running Linux, and its capabilities, and the expansion modules, as well as their common features, solutions and functions.

As the first step in the product design, I present another device made by PROLAN Zrt., the ProField product family's three-phase voltage and current measurement module, AF500 as a reference for making the specification of the new module. During the design of the system, I present the different voltage and current measurement methods and data processing solutions, and then, after comparison, I present the system architecture of the measuring module.

I describe the hardware design steps, including component selections and dimensioning, schematic and PCB design. I pay special attention to the mechanical designs due to the compactness of the module.

Software components are demonstrated first in the embedded environment, showing the special structures and functions that are module specific. I show how the already written C-RTU specific software layer should be used, and how to access the various functions already developed. I show the capabilities of the host system's display, its simple configuration, and the steps of accurate calibration of the module through examples.

Finally, I present an actual application, illustrating the capabilities of the system, in particular, the performance of the measurement module.

Bevezető

A villamosenergia az elmúlt évtizedben a háztartások és ipar mellett a közúton is egyre jelentősebb részesedéshez jutott, a villanyautók terjedésével a belsőégésű motoroknak a száma folyamatosan csökken. A villanyautók tényleges elterjedésével a tisztább levegő és csendesebb közutak mellett egy máig meg nem oldott probléma is jár, hiszen ezek a járművek jelentős árammal töltik az akkumulátorukat, erre pedig sok fogyasztó egyidejű igénye esetén a legtöbb helyen nincs felkészítve a rendszer.

Egy másik 21. századi fejlődési irány a villamosenergetikában a kis teljesítményű, otthoni naperőművek terjedése, mely a háztartás alacsony fogyasztása esetén visszatáplál a hálózatba, megfordítva az energiaáramlás eddig megszokott irányát. Ebben az üzemben az energiaszolgáltatás tulajdonságai részben az addig fogyasztóként jelen lévő, újonnan termelővé vált háztartáson múlik.

Ez utóbbi két példa után látható, hogy a villamosenergia hálózatok ezelőtt nem látott terheléseknek vannak és lesznek kitéve, az energetikusoknak új kihívásokat kell legyőzni. Ezeknek a problémáknak a megoldására a teljesítményminőség mérése, illetve a villamosenergia szolgáltatók által nyújtott áram szabályozása, valamint a fogyasztók által kibocsátott zavarok korlátozása lett bevezetve.

Ahhoz, hogy a teljesítményminőségről átfogó képet lehessen kapni, arról érdemi következetet lehessen levonni, a hálózat számos pontján kell méréseket végezni.

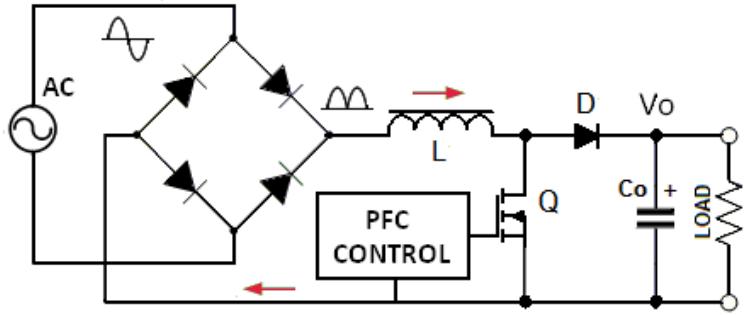
1. fejezet

Energetikai áttekintés

1.1. Teljesítményminőség

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. Amennyiben a fázisokhoz tartozó áramok tulajdonságait is vizsgálat alá vonjuk, beszélhetünk teljesítményminőségről. A magyar hálózati feszültségek szabályozását az MSZ 1:2002-es szabvány [1] 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 lehetnek, jelentős kiesésekkel, leállásokat, így többlet költségeket róhatnak a fogyasztókra.

A hálózatra csatlakoztatott, fázisonként legfeljebb 16A fogyasztású eszközök áramfelvételeinek harmonikus tartalmát az MSZ EN 61000-3-2 [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 áramfelvételiük felharmonikus tartalma igen magas, emellett teljesítmény tényezőjük alacsony. Pontosan ez utóbbi két tulajdonság miatt került bevezetésre a harmonikus kibocsájtást korlátozó szabvány.



1.1. ábra. Aktív PFC felépítése

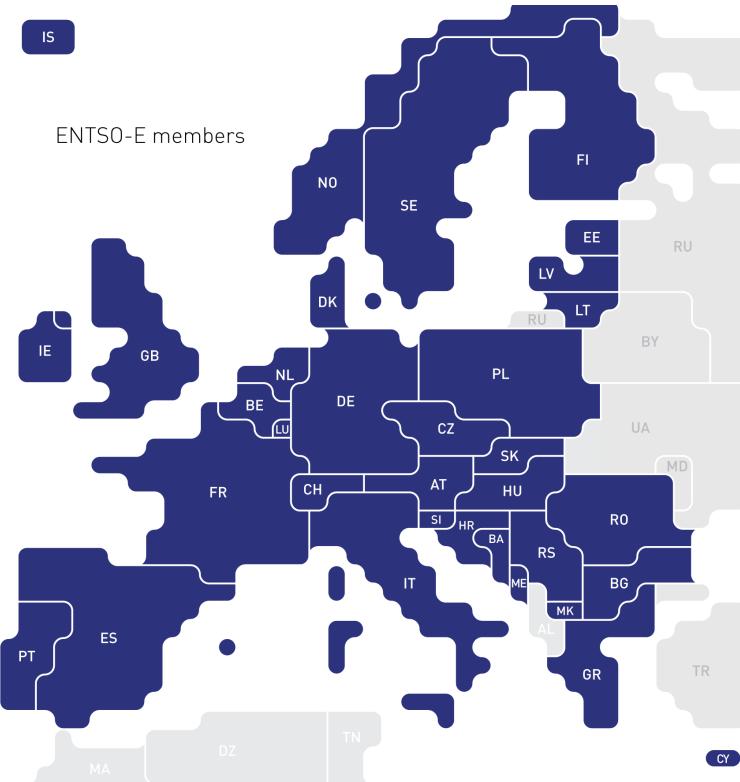
A szabvány betartásának érdekében manapság leggyakrabban aktív PFC-t használnak, ennek egyszerűsített kapcsolása a 1.1 ábrán látható. Ez az áramkör a hálózati feszültségre szinkronizálja az áramfelvételt, így a teljesítménytényezője 1-hez tart.

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 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.

1.1.1. Teljesítménymínőség összetevői

Az 50Hz-es villamoshálózatok teljesítménymínőség mérését az MSZ EN 61000-4-30 szabvány [3] fogalmazza meg. A szabvány olyan eljárásokat és követelményeket ír le, amelyeket betartva a teljesítménymínőség összetevőit megbízhatóan, megismételhetően tudjuk mérni, a konkrét mérőeszköztől függetlenül. A mérőparaméterek ajánlott listája a következő:

- Hálózati frekvencia:* Szigorú előírások vannak erre a paramétrere, hiszen amennyiben nem ugyanolyan a frekvenciája két villamoshálózatnak, vagy más a fázisuk, speciális berendezéseket kell alkalmazni, hogy egyik rendszerből a másikba energiát vihessünk át. Éppen emiatt nagyobb hálózatok, mint például az Európai Villamosenergia Átviteli Hálózat (ENTSO-E) az 1.2 ábrán látható országok generátorait tartja szinkronban normális működés közben, biztosítva ezzel villamosenergia áramlást a résztvevő országok között.



1.2. ábra. ENTSO-E tagállamok [4]

2. *Feszültség amplitúdó:* A hálózati feszültség amplitúdójának stabilitása szükséges a rákötött eszközök megfelelő működéséhez. Amennyiben gyakran fordulnak elő túlfeszültségek, az a készülékek öregedéséhez vezethet, míg a gyakori feszültség beesések, vagy kimaradások a villamosberendezések használatát akadályozzák.
3. *Áram amplitúdó:* Az áram amplitúdója már a fogyasztáshoz kapcsolódik, éppen emiatt ez már a teljesítményminőség méréséhez szükséges. Az áramfelvétel visszahat a feszültségre, mivel a villamoshálózat az ideálistól eltér.
4. *Feszültség- és áramharmonikusok:* Az ideális szinusz helyett a valóságban torzult, harmonikusokkal terhelt feszültség mérhető a hálózaton. Ennek oka, hogy a fogyasztók nem tisztán rezisztív, fogyasztásuk nagyon gyakran nemlineáris, ezért áramfelvételükben felharmonikusok jelennek meg. A torzult áramfelvétel pedig visszahat a feszültségre, mivel a hálózat impedanciája nem nulla.

A szabványban különböző hálózati események is felsorolásra kerülnek, melyek vizsgálata fontos információkkal szolgálhat az energetikusoknak:

1. *Villogás:* A hálózati feszültség amplitúdójának periodikus változása. Ezt a jelenséget leggyakrabban világítástechnikai eszközök fényén lehet észrevenni, innen is kapta a nevét.
2. *Feszültségsökkenés:* Hosszabb ideig tartó esemény, mely során a névleges feszültség alá kerül a hálózat.

3. *Feszültségletörés*: Rövid időre fennálló feszültség csökkenés, mely során a hálózati feszültség a névleges feszültség 90%-a alá esik.
4. *Feszültségnövekedés*: Rövid ideig tartó jelenség, mely során a hálózati feszültség a névleges 110%-a felé emelkedik.
5. *Feszültségkiesés*: A hálózati feszültség 10% alá esik a feszültség, több részre osztják az alapján, hogy mennyi ideig áll fent: Lehet pillanatnyi, rövid, hosszú.
6. *Tranziensek*: Fél hálózati periódusnál rövidebb ideig tartó események tartoznak ide, legyen az akár túlfeszültség, vagy feszültségbeesés.
7. *Asszimetria*: Amennyiben egy háromfázisú rendszerben a fázisfeszültségek nem egyenlőek, asszimmetriáról beszélhetünk, amely például a rákapcsolt fogyasztók károsodásához vezethet.

1.1.2. MSZ EN 61000-4-30 követelményei

A szabvány a mérési követelményeket két csoportra bontja, ezek az "A" és "B" osztályba vannak sorolva.

1. *A osztály*: Az olyan helyeken használandó, ahol precíz mérések szükségesek, például szabványoknak való megfelelés vizsgálatánál, vagy valamilyen vitatott szituáció szakszerű rendezésénél. Két különböző A osztályú műszerrel végzett bármely teljesítményminőségi értéknek a specifikált tolerancián belül kell lennie.
2. *B osztály*: Ahol csak statisztikai információk gyűjtése a cél, hibák felderítése több mérési pont alapján, ott használható az ebbe az osztályba tartozó műszer.

A osztály esetén a mért értékeket három különböző átlagolási intervallumon kell kiértékelni: 3 másodpercenként, 10 percenként, 2 óránként. B osztályú eszköznél a gyártóra van bízva a döntés, a választott megoldást közölnie kell a felhasználóval.

A mérendő paraméterek, illetve az ahhoz tartozó pontosságkritériumok a 1.1 táblázatban láthatók. A kihúzott részen a gyártóra van bízva, hogy megadjon egy specifikált értéket.

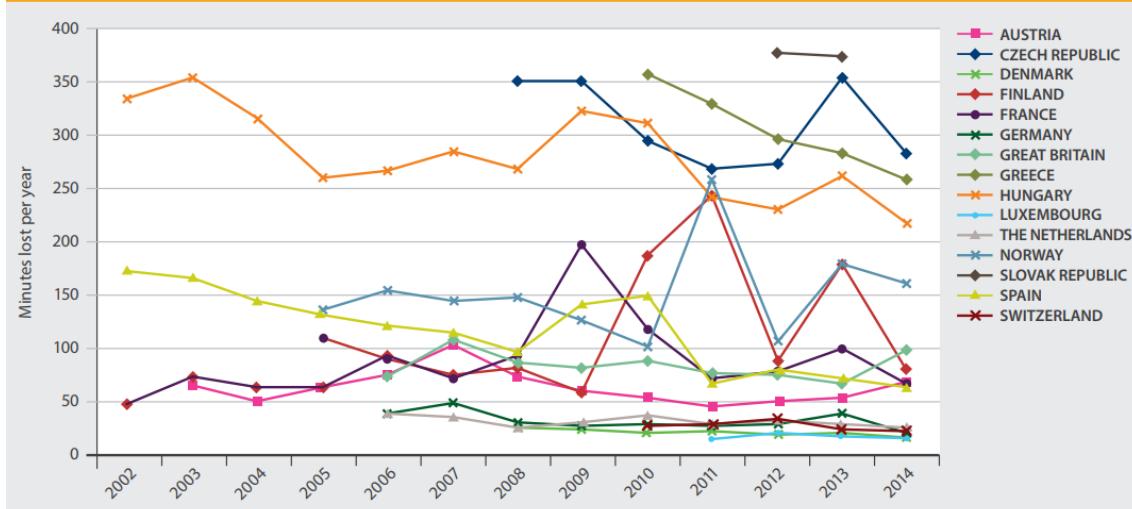
Paraméter	A osztály	B osztály
Frekvencia	$<\pm 0.01\text{Hz}$	-
Feszültség	$<\pm 0.1\%$	$<\pm 0.5\%$
Áram	$<\pm 0.1\%$	$<\pm 2\%$

1.1. táblázat. MSZ EN 61000-4-30 által támasztott követelmények [3]

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 Európán belül. A legutóbbi ilyen összehasonlítás, a 6th CEER Benchmarking Report on all the Quality of Electricity and Gas Supply 2016 [5] volt, mely immár a 6. ilyen kiadvány. Az ebben feltüntetett adatok jól szemléltetik a különböző fejlesztési lehetőségeket.

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



1.3. ábra. Hosszú kimaradások ideje évente [5]

Az 1.3 ábrából jól látszik, hogy Magyarországon (Narancssárga trendvonal) összességeiben javuló tendencia mutatkozik a hosszú kimaradások tekintetében, azok száma 2002-höz viszonyítva 30-40%-kal csökkent, habár összevetve a vizsgált országokkal látható, hogy a mutató viszonylag magas összességében. 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, ugyanakkor már a feszültségszintek felosztásában is lehet eltérés országok között.

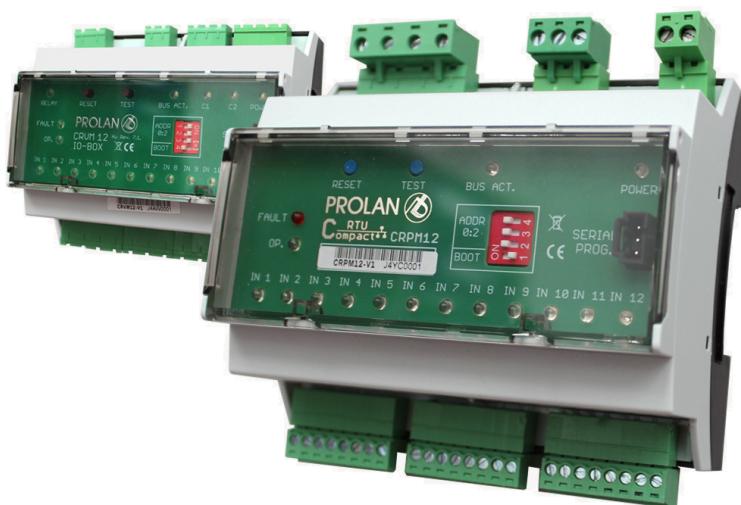
A jelentés több ajánlást is tesz a jövőbeni szolgáltatásminőség javításához, ezekben elsősorban arra ösztönzi az áramszolgáltatókat, hogy növeljék a megfigyelési pontok számát, a minőséginformációk legyenek egységesek a vizsgált országokon belül.

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 okos hálózat 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 eszköz igényel. Diplomamunkám keretében ennek az eszköznek a fejlesztését mutatom be.

2. fejezet

C-RTU család

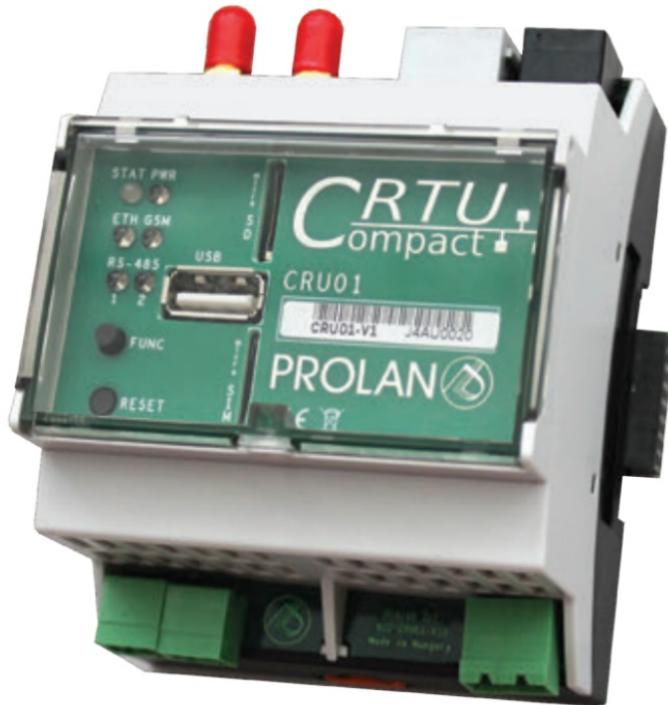


2.1. ábra. C-RTU család moduljai

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. [6] 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 vezérelnie.

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 (Pulse Per Second) 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 [7] 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 master-es 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 [8] 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 gyárattni 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 felhasználási területre elég egy kisebb nyereségű antenna, a felhasználók plusz költség nélkül hozzáférnek ezekhez.

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 [9] 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 alállómások és az energielosztó 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 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. *Vonali feszültségek*
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 fontosságú. Vegyük számításba a lehetséges megoldásokat.

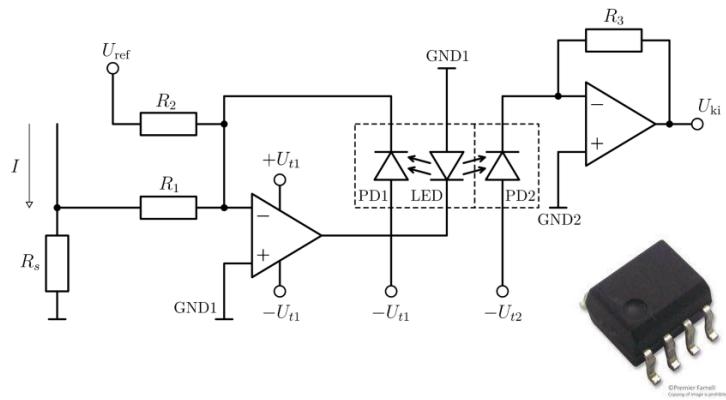
3.2.1. Feszültségváltó transzformátor

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 leképezzük 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 műveleti erősítők kikompenzálgák.



3.1. ábra. Lineáris optocsatolós analóg jel leválasztás [10]

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 körülbelül 100x alacsonyabb, mint az analóg izolációs erősítőké.

3.2.4. Feszültségmérési megoldások összehasonlítása

Vessük össze a felsorolt feszültségmérési módokat a legfontosabb jellemzőik alapján:

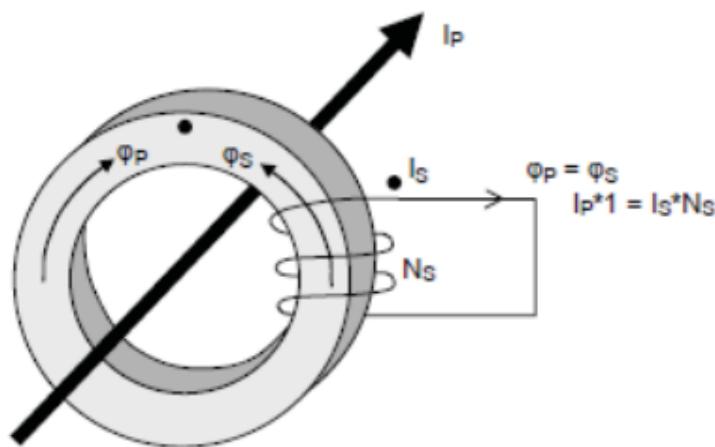
3.3. Árammérés

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

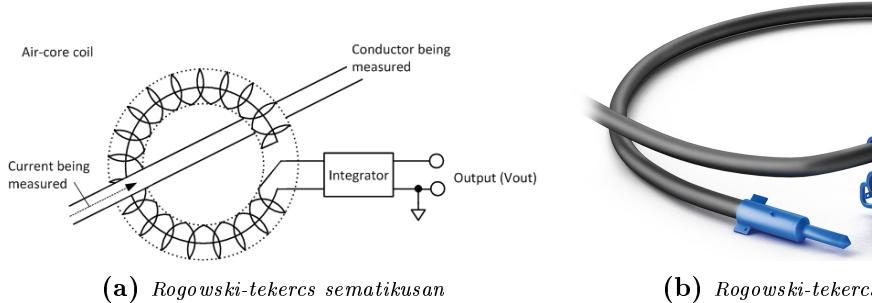


3.2. ábra. Áramváltó transzformátor működési elve

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 lezárasáig.

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 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. ábra. *Rogowski-tekercs [11]*

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.

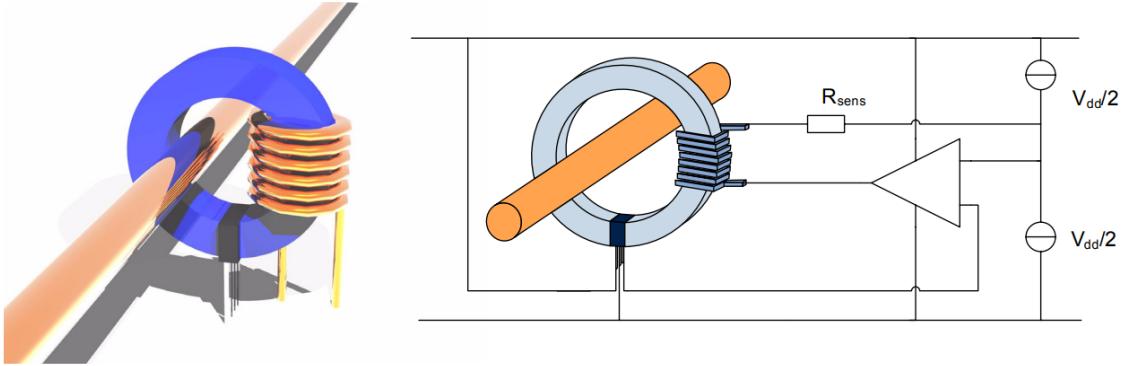


3.4. ábra. *Négy kivezetéses árammérő sönt [12]*

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 [13]

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 téterősség körül működnek a leg pontosabban, így egy további műveleti erősítő 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 tollerancia	Magas	Magas	Alacsony	Magas
Frekvencia tartomány	Kicsi	Nagy	Nagy	Közepes
Galvanikus leválasztás	Inherens	Inherens	Analóg szükséges	Inherens

3.3. táblázat. Árammérési megoldások [14]

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 végrehajtási 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

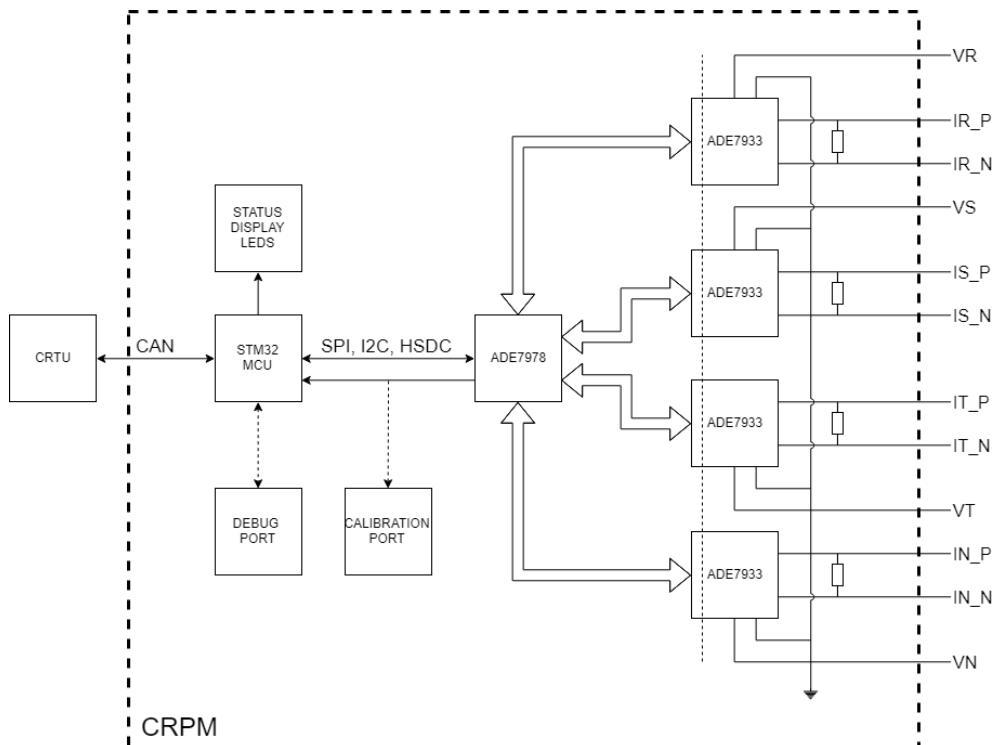
Több gyártó kínál komplett megoldásokat egy tokban realizálva. Ezek tartalmazzák az analóg front-end-et, nagy felbontású analóg-digitális átalakítót, valamint egy előre felprogramozott digitális jelfeldolgozó processzort. Az Analog Devices egyik termékcsaládja még 5kV RMS izolációt is biztosít a digitális interfészéhez egy tokban, illetve ugyanitt leválasztott segéd tápot is előállít a mérő oldalnak [15]. 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 utánanézni az adott alkatrész beszerezhetőségének.

3.5. Választott megoldás

A felsorolt tulajdonságokat összevetve, illetve súlyozva azok fontossága szerint, feszültség-méréshez az Analog Devices ADE7978 beégetett kódú DSP-jét, illetve az ehhez a csatládhoz 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 $\pm 31.25\text{mV}$, amennyiben ehhez a $5\text{m}\Omega$ -os tervezett mérő-söntöt vesszük, a maximális disszipáció nem haladja meg a 100mW -ot sem, így a választott mérési elv nem jár jelentős hőfejlődéssel, a működési hőmérséklet a környezetitől nem fog jelentősen eltérni.

Ezen döntések után kialakított rendszer felépítése a 3.6 ábrán látható



3.6. ábra. Rendszer felépítése

Egy használható áramváltó, melyet később a tesztalkalmazásban is választottam, a Schneider Electric 16451-es 50/5-ös áramváltó transzformátora [16]. 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 3.4 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 az áramváltóval kalibráció nélkül is.

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 feltüntetik. Ebben a konfigurációba arra kell figyelni, hogy az árammérő valamint a feszültségmérő bemenetek bekötésénél a fázisfeszültség ne kerüljön a mérő IC bemenetei közé, csak a nagyfeszültségű ellenállásosztón keresztül. Ez vagy úgy érhető el, hogy a nullvezető áramát mérjük a sönttel, és ekkor a nagyfeszültségű ellenálláság a fázisra van kötve, vagy pedig a fázisvezető áramát nézzük, ilyen bekötésnél pedig a nullvezetőt kötjük a nagyfeszültségű ellenállásosztóra.

3.5.1. Elméleti specifikáció, funkcionálitás

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:

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 frekvencia tartomány	45-65Hz
Működési hőmérséklet-tartomány	-40...+85C°

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

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*
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 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 funkcionális 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:

1. *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.
2. *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.
3. *Alkatrézértékek 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.
4. *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.

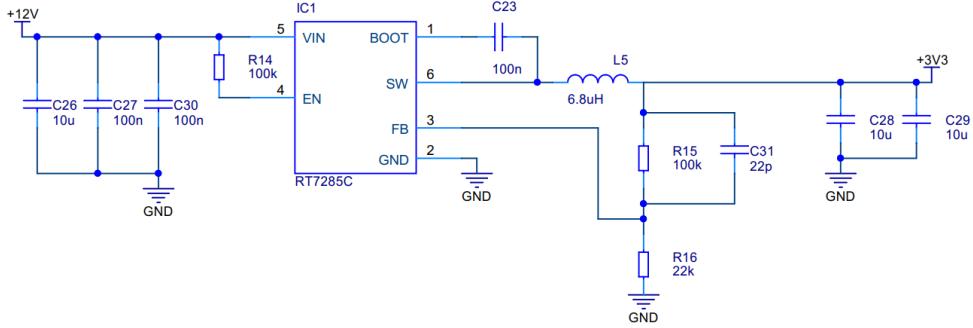
4.2. Kapcsolási rajz

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 busz feszültségről 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 alkatrészigénye 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 hőmérséklet tartomány	-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 következőben 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, amelyek 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 minden a két irányban. Amennyiben nagyobb induktivitást alkalmazunk, csökkentjük az áramhullámosságot, ezzel pedig a kimeneten fellépő feszültséghullámosságot, de cserébe rontjuk a tranziszorokat 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 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

vegyünk $20\mu F$ -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 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, így az értékválasztások megfelelőek.

4.2.2. MCU és környezete

A mikrokontrollert külső kvarcról van járatva, hogy a nagysebességű CAN-hez megfelelő pontosságú órajele 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.

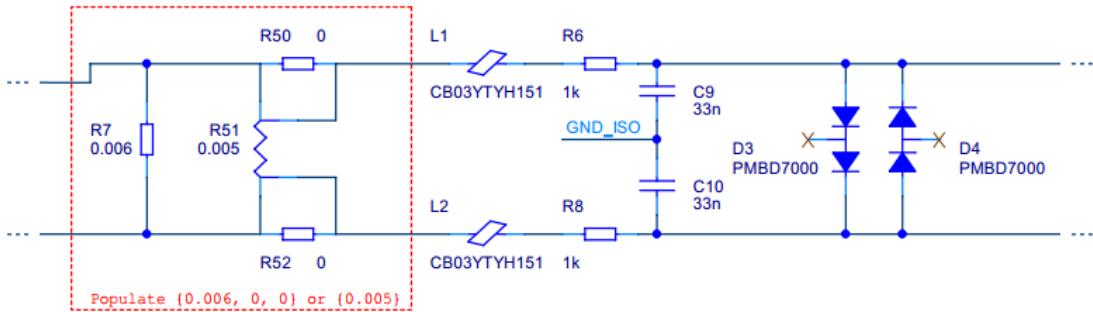
A processzor helyes és stabil működéséhez mindenkorábban jól megszűrt tápot kell alkalmaznunk, még ha ideális körülmények között nem is lenne szükség ilyen mértékű zajelnyomásra. A tényleges felhasználás során, illetve az EMC tesztek alkalmával jelentős zavarokkal terhelhetjük az áramkört, az ez elleni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

A megfelelő szűrés elérésének érdekében különböző értékű kondenzátorok lettek párhuzamosan 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 első körben ökoliszabályokon alapul, az eszköz működési sebességből lehet egy olyan frekvenciatartományt becsülni, ahol a digitális áramkörök belső, gyors kapcsolásaiból keletkező komponensek lesznek. A szűrőnek ezen a tartományon mindenkorábban kapacitív, alacsonyimpedanciásan kell viselkednie. A valós alkatrészek fizikai kialakításuktól, illetve a köztük és az áramfelvétel helye közötti vezetékezésből származó induktivitás és ellenállás jellemzi, amik egy bizonyos frekvencia felett meggyötörjük a szűrést, induktív jellegűvé téve a kondenzátort. Ezeket a parazita hatásokat minél kisebb tokozással, illetve a tápbemenetekhez való minél közelebbi elhelyezéssel lehet csökkenteni.

4.2.3. Bemeneti áramkör - Áram bemenet

A CR-PM3 árammérő bemeneteit elsősorban árammérő transzformátorok fogadására kell felkészíteni, ugyanakkor szem előtt kell tartani az esetleges tisztán (külső) söntös alkalma-



4.2. ábra. Az áramméréshez tartozó bemeneti áramkör

zások lehetőségét. Egy bemenethez tartozó áramkör kapcsolási rajza a 4.2 ábrán látható 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 opció 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 elképzelhető, 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 Ω -os nagyságrend alatti impedanciát képviselnek, szűrő hatásukat a 100MHz, illetve afeletti tartományban fejtik ki.

Az RC aluláteresztő tervezett töréspontja

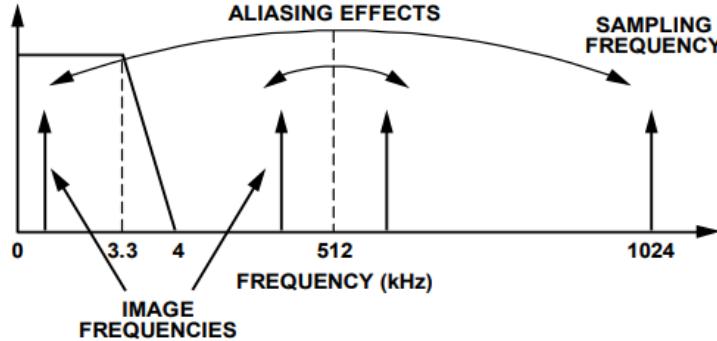
$$\frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 1000 * 33 * 10^{-9}} = 4823\text{Hz}$$

ez 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 tükörfrekvenciás komponenseket keltő zavaró jelek szintén ezen frekvencia közelében lesznek. Ezeken a frekvenciákon az RC szűrő átviteli karakterisztikája közelítőleg

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

Ez pedig valószínűsíthetőleg megfelelő elnyomást fog biztosítani a normális működéshez.

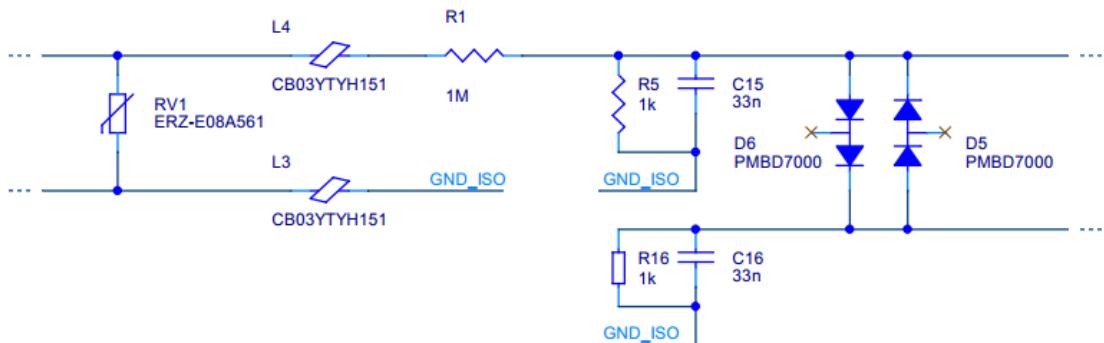
A bemeneten található gyors diódák hatékony kétirányú ESD védelmet biztosítanak, illetve túláram esetén a keletkező hosszabb idejű feszültségtükék levágását biztosítják. A szivár-



4.3. ábra. Átlapolódás jelensége az ADC bemenetén [15]

gási 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



4.4. ábra. A feszültségméréshez tartozó bemeneti áramkör

A feszültségmérő bemenetek kialakításukat tekintve nagyban hasonlítanak az áramméréshez használtakhoz. Az ehhez tartozó kapcsolási rajz részlet a 4.4 ábrán látható.

Nagyfrekenciás 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 mérési tartományra való leképezését egy egyszerű ellenállásosztó biztosítja, melyben 0.1%-os precizitású alkatrészeket használtam. Ez az ADE7933 $\pm 0.5V$ -os névleges bemeneti tartományra kell leképezni a névleges 230V-os effektív hálózati feszültséget, 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 feszült-ségtűrés, hiszen erre az alkatrésszre 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:

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

Túlfeszültségvédelem

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 [17]:

1. *Szikraköz* A túlfeszültség védelmek közül ez a legegyszerűbb, itt az átütés jelenségét használjuk fel védelmi célokra, amelynek kritikus feszültsége viszont a környezeti körülményektől erősen függ. A szikraközt mindenkorábban áramkorlátozó eszközzel (Kismegszakító, olvadóbiztosító [18]) 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 karakterisztikájú 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 feszültségtüske 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 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 modellből 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 viák 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 sikerült egy oldalas szerelésre elkészíteni, ezzel csökkentve a modul gyártási költségét.

4.3.1. Tápegység NYÁK terve

A kapcsolóüzemű tápegység NYÁK tervé legalább olyan fontos szereppel bír, mint az alkatrészek értékeinek meghatározása, mivel ha az alkatrészek elrendezése, vagy a vezetékezés nem megfelelő, akkor a táp működésében rengetegfélé módon alakulhat ki rendellenes működés. A kialakított terveket a 4.5b ábrán láthatjuk.

Az egyik nagyon fontos szempont, hogy a lehető legrövidebbek legyenek a kapcsolófrekvenciás áramhurkok. Ezt a bemeneti hidegítés táp bemenetekhez való minél közelebbi elhelyezésével, illetve a kimeneti feszültségi tekercs és a szűrő kondenzátorok kapcsoló kimenet-hez helyezésével érhető el. minden tápegység tervezésénél kitűnő kiindulási alapot adhat

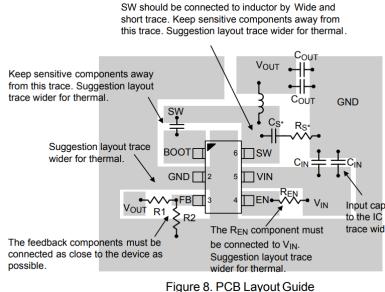
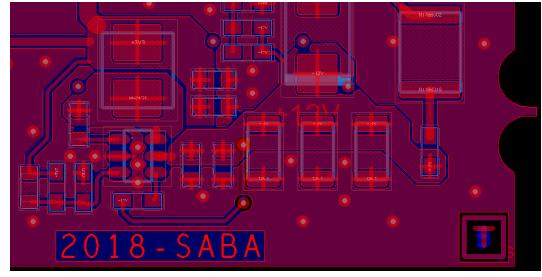


Figure 8. PCB Layout Guide



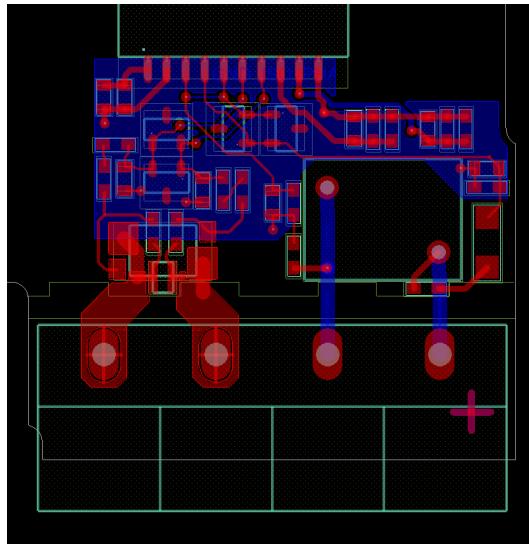
(a) *RT7285 ajánlott elrendezése, huzalozása [19]*

(b) *Kapcsolóüzemű tápegység NYÁK terve*

4.5. ábra. *RT7285 alapú tápegység NYÁK terve*

az adott alkatrész adatlapja, mivel azok általában közölnek ajánlott kapcsolást, amelyen magyarázatokkal közlik, hogy melyik alkatrész elhelyezésénél és vezetékezésénél mire kell ügyelni, ez látható a 4.5a-es ábrán.

4.3.2. Mérő bemenetek kialakítása



4.6. ábra. *CR-PM3 mérő bemeneteinek NYÁK terve*

A mérőbemeneteknek kell a legnagyobb igénybevételt kibírniuk, így két fő szempont volt szemelőtt a NYÁK kialakításánál:

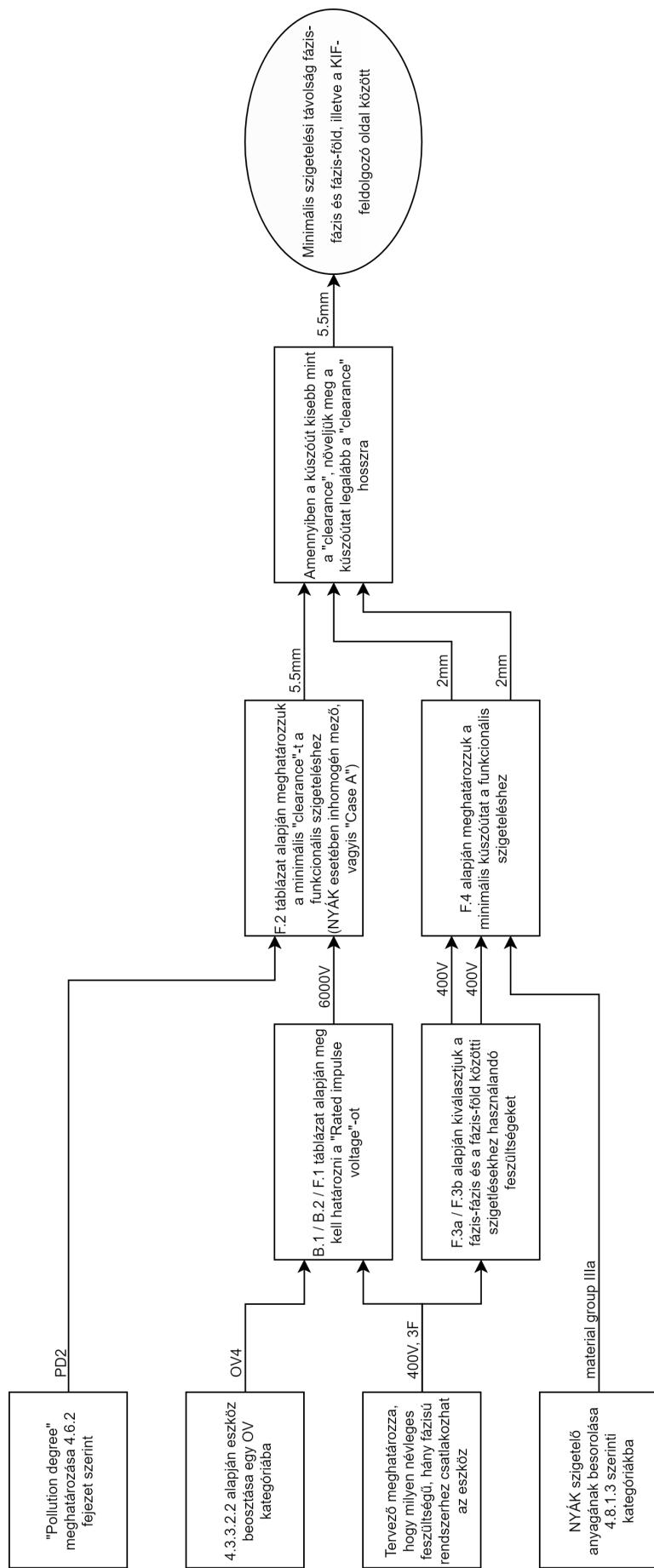
- Feszültség bemenet:* Ezeknek jelentős differenciális és közösmódusú feszültségtüskéket kell kibírnia anélkül, hogy akár az áramcsatornába, akár az áramkör érzékenyebb részeibe azok átjussanak. Ezt megfelelő szigetelési távolságokkal, illetve a varisztor feszültségkorlátozó hatásával értem el.
- Áram bemenet:* Ezeknek a bemeneteknek kevesebb zavart kell elviselni, itt inkább a túláramtűrés, valamint a termikus viszonyok a kritikusak. Ezeket az alacsony ellenállású sönt, illetve a megfelelő vastagságú vezetékezés biztosítja.

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

4.4.1. Szigeteléskoordináció

Az egyik betartandó szabvány az MSZ EN 60664-1 [20]. 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 idő intenzív, éppen ezért készítettem a 4.7 ábrát, amivel egyszerűbb a szükséges minimális távolságok meghatározása.



4.7. ábra. Szigeteléshordozáció MSZ EN 60664-1 alapján [20]

A szabvány számszerűen figyelembe veszi a környezeti jellemzőket a felhasználás helyén, mint például a tengerszint feletti magasságot, vagy a szennyezettség mértékét (PD1...PD4). A páratartalmat, hőmérsékletet, illetve egyéb paramétereket a szabvány egy másik fejezetében írja le pontos a szabványcsalád.

Ez a szabvány megadja a kúszóáramutak minimális hosszát, illetve a minimális légközök nagyságát.

1. *Felületi kúszás:* A szilárd szigetelések felületén, hosszabb ideig fennálló feszültség hatására létrejövő vezetés. Függ többek között a felület szennyezettségétől, a szigetelőtől, a feszültségtől.
2. *Átívelés:* A gáz szigetelőn keresztül létrejövő vezetés, mely általában rövid túlfeszült-ség hatására jön létre.

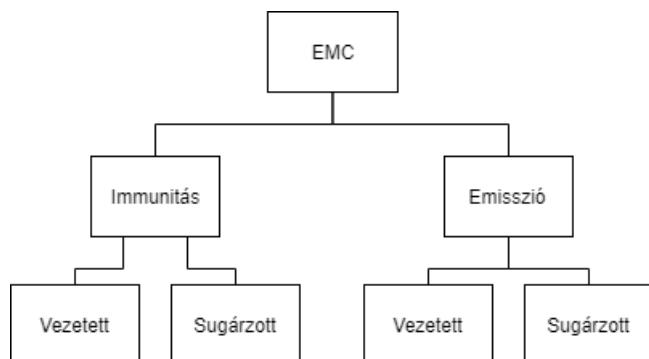
Általában az átívelés megakadályozásához szükséges légköz nagyobb, mint a minimális kúszóút. Amennyiben ez így van, a szabvány alapján a minimálisan szükséges szigetelési távolság két vezető között a minimális légköz hossza. Itt példaképpen a CR-PM3A nyákján 2mm-es kúszóutat, 5mm-es légközt ír elő a szabvány a hálózati feszültségű rész és a feldolgozó elektronika oldala között, így a minimális szigetelési távolság 5mm.

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 fő komponense:

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

A csatolás módja szerint további részekre bontjuk az EMC ágait, ez látható a 4.8 ábrán.



4.8. ábra. EMC vizsgálatok osztályzása

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 legkevésbé 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 hiabaforrásra. 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 [21]:

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 tartozó 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:

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 tesztjeit 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.

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 közel kábelek induktív és kapacitív egymásra hatását 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.

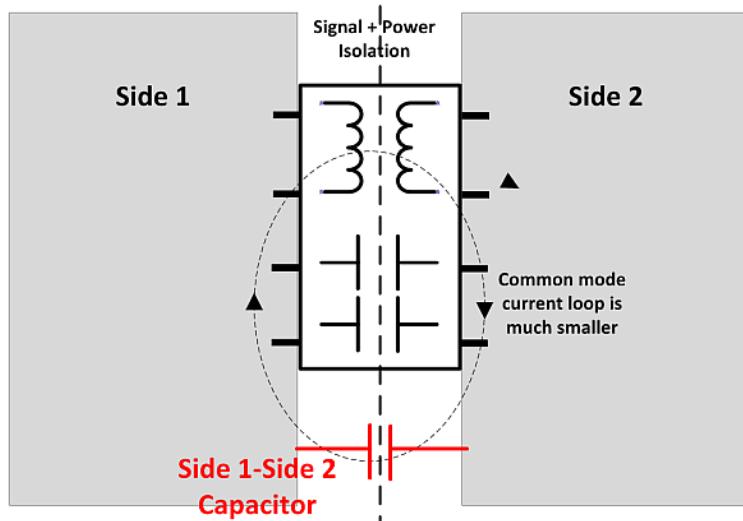
Emisszió

A zavarkibocsájtás 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 bemenetei 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 minden volt valamilyen emissziós gond. Ahhoz, hogy egy apró tokozású, néhány mm-es alkatrészen belül tápot 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 tranzisztorai a szekunder oldalon közösmódúsú zavarokat tud kelteni. Ezek a zavarok viszont csak a két oldal közötti, NYÁK szintű kapacitásokon keresztül tudnak záródní, ami így viszont jelentős méretű, nagyfrekvenciás áramhurkok létrejöttéhez vezethet.



4.9. ábra. Emisszió csökkentése integrált izolált táp esetén [22]

Az innen származó sugárzás csökkentésére az egymástól elszigetelt földeket érdemes egy nagyfeszültségű, kis értékű, néhány száz pF-os Y kondenzátorral összekötni, amely megfelelő kapacitás érték választása esetén a zavart gyakorlatilag kisöntöli, amint azt a 4.9 ábra szemlélteti. Az Y osztályú kodenzátorok megnövelte 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 üzemfeszültségük, 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 dielektrikus szilárdságát, illetve a szabványok által előírt szükséges minimális szigetelési távolságokat. [23] [22]

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. [23]

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 MSZ EN 62052-11:2003 termékszabványban találhatóak a szükséges mérési szintek, illetve speciális mérési előírások. Az szabvány által elvárt értékek a 4.2-es táblázatban láthatók.

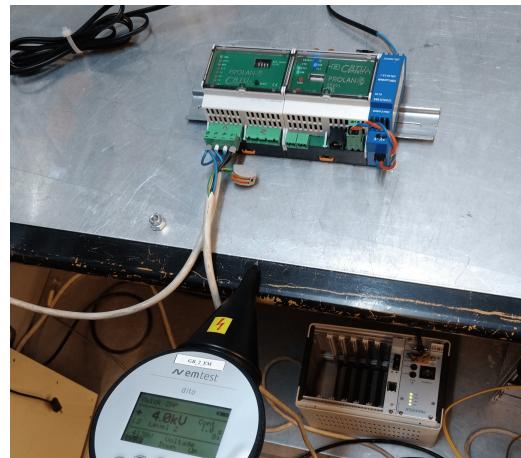
Teszt	Szint
Elektrosztatikus kisülés	8kV érintési, 15kV átütési
Burst	4kV
Surge	4kV, 2Ω-os generátor impedanciával
Vezetett RF	10V, 150kHz-től 80MHz-ig

4.2. táblázat. *MSZ EN 62052-11:2003 által támásztott EMC immunitási követelmények [24]*

ESD (MSZ EN 61000-4-2)



(a) Zavarás vertikális csatolósíkkal



(b) Zavarás horizontális csatolósíkkal

4.10. ábra. *ESD teszt csatoló síkokkal*

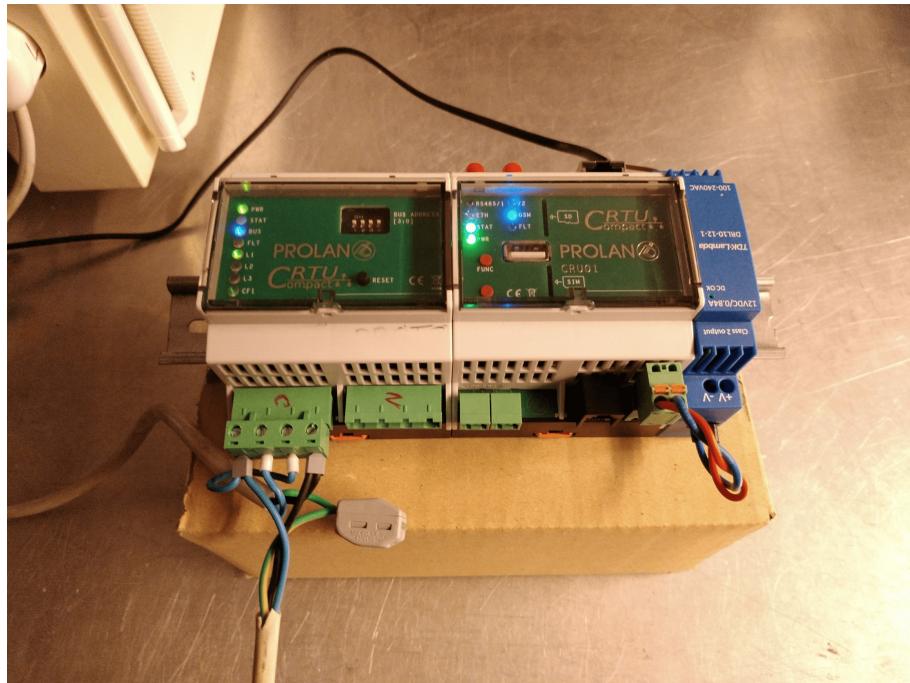
Mivel a CR-PM3 semmilyen vezető felülete nem érinthető a felhasználó által, így csak átütési kisülést (air discharge) kell vizsgálni az érinthető, szigetelő felületek határain, például

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). [25]

Erre a tesztre az MSZ EN 62052-11:2003 termékszabványban előírt feszültség 8kV, amit az STM32-es processzor hiba nélkül kibírt minden 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 következetésre jutottunk több kollégámmal, hogy az áramkört mindenkorral legalább 4 rétegű NYÁK-ra kell tervezni a javított zavarvédelem érdekében.

Burst (MSZ EN 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. [26]



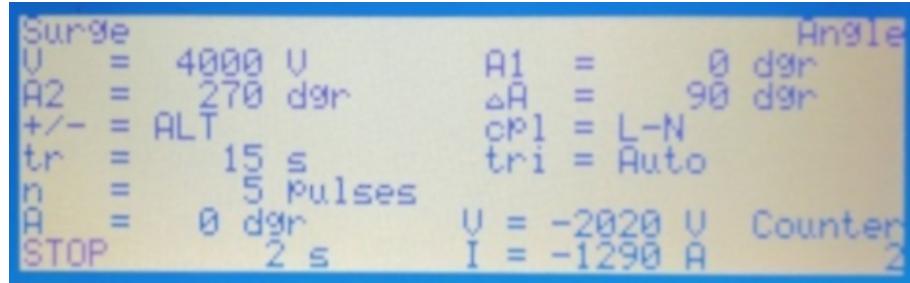
4.11. ábra. Burst és surge teszt mérési összeállítása

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

Surge (MSZ EN 61000-4-5)

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

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

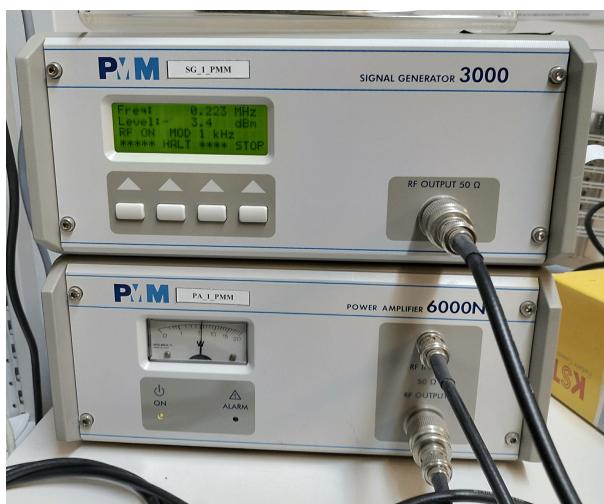


4.12. ábra. Szimulátor beállításai és mért értékei surge teszt alatt

Ezen a teszten sem történt funkcióvesztés, az értékek a webes felületen folyamatosan frissültek. Érdemes megnézni a 4.12 ábrán kiírt értékeket, hiszen itt látható a bemeneti védelem működésének eredménye: A varisztor 2020V-nál fogta meg a túlfeszültséget, emellett pedig 1290A-t vezetett el. Ez a varisztor adatlapja alapján még megengedett terhelés a rövid idejű impulzus esetén.

Vezetett RF (MSZ EN 61000-4-6)

A rádiófrekvenciás terek által keltett vezetett zavarok vizsgálata során nem tapasztaltunk hibás működést. A zavaró jel 150kHz-től 80MHz-ig pásztázta végig a frekvenciatartományt. [27]



4.13. ábra. Vezetett RF zavarok méréseihez használt eszközök

4.4.4. Javítási tervek

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

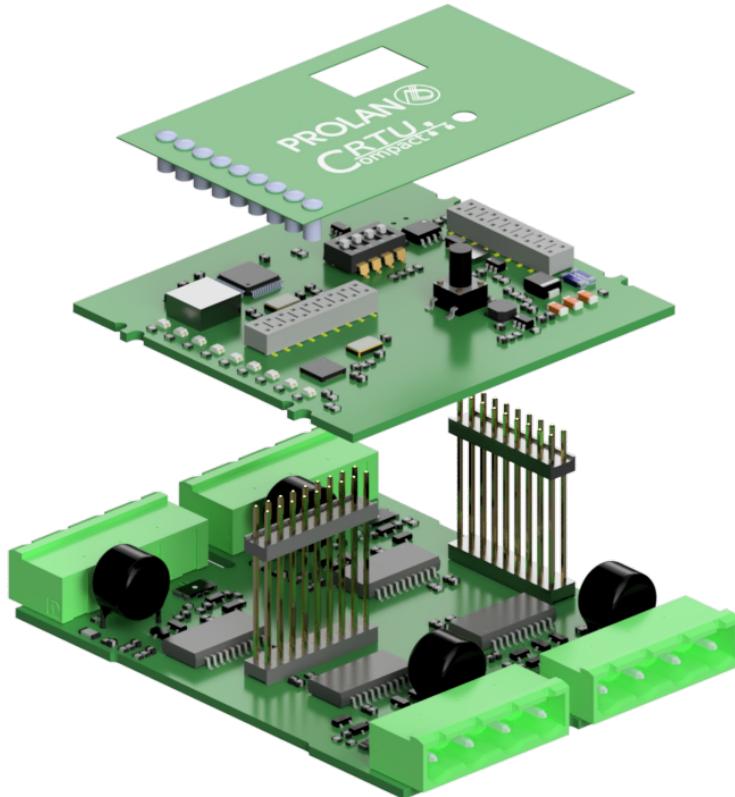
1. *Rétegszám növelése:* Kétségkívül a legfontosabb módosítás legalább két további réteg felvétele, amelyek egybefüggő földkitöltést, illetve táp szigeteket tartalmaznak. Ezek a visszaáramok szempontjából alacsony impedanciás utat biztosítanak, táp szempontjából pedig egy nagyon alacsony impedanciájú, néhány 100pF-os kondenzátort jelentenek, amely nagyobb frekvenciákon (például ESD által keltett tranzisztorok 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 zavar tűrés és kibocsátás 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 tp 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.

4.5. 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.

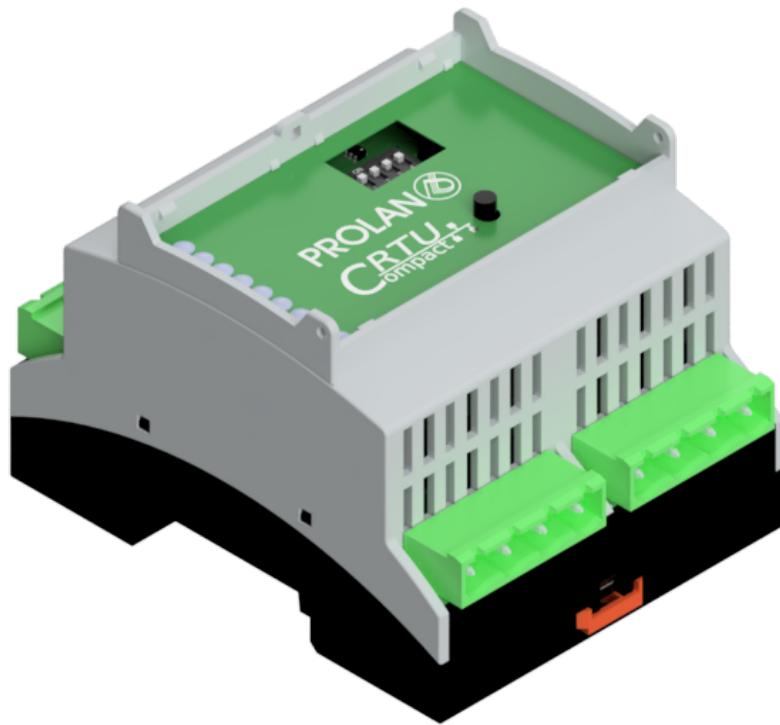


4.14. ábra. *CR-PM3 összeállítása*

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 [28] családba tartozó tűsorával, és HLE [29] családba tartozó hüvelyisorával valósítottam meg. A DW tűsorok a szokványos társaitól eltérően egy további műanyag távtartóval rendelkeznek, amely magasságát 5 mil 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 szereléstőre 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



4.15. ábra. *CR-PM3 a készülékházban*

modulon egy addig nem használt megvalósítást próbálhattam ki. SMD LED-eket helyeztem el a CR-PM3C-n, majd a CR-PM3P előlapí NYÁK-ra bepréselhető Bivar PLP2-215 [30] 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^2 alatti, ez pedig a legtöbb alkalmazásban nem jelent szűk keresztmetszetet.

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 flash-ben 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

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 legvégre 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);

```

Az 5.1 táblázatban látható a külső EEPROM illetve a flash alapú, emulált EEPROM paramétereinek összehasonlítása.

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

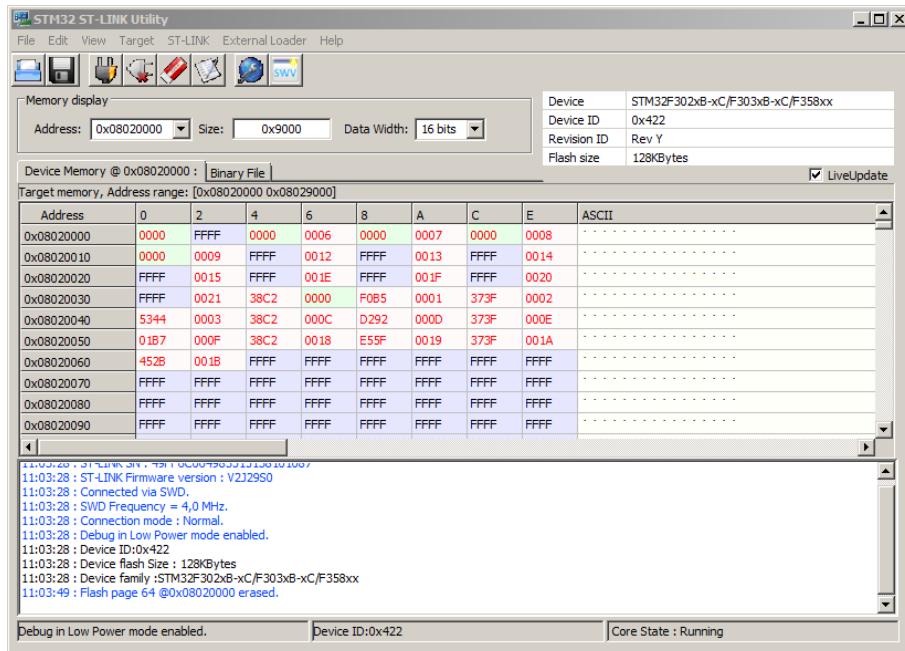
A CR-PM3-ban a legtöbb kalibrációs változó típusa egyszeres-precizitású lebegőpontos, ezek letárolása és visszaolvasása 16 bites regiszterekkel némi bit manipulációt igényel, az ezeket megvalósító függvények:

```

1 void eeStoreFloat(float data, uint16_t ee_address);
2 void eeReadFloat(volatile float* calib_address, uint16_t ee_address);

```

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, ennek egy képernyőképét láthatjuk az 5.1 ábrán. Ezzel a kalibrációs függvények fejlesztése nagyban egyszerűsödött, az esetleges hibákat az első futásnál fel lehetett ismerni.



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

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 reteget 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 áramkörtervezés folyamatában használtam az STM32CubeMX programot, amellyel egyszerűen felkonfigurálhatjuk a választott STM32-es mikrokontrollert egy grafikus felületen keresztül.

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 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

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.

```

1 struct meas_register reg_list_L1[MAX_NO_OF_REGS_TO_READ/3];
2 struct calib_data calibration_data_11;
3 regs_of_interest_L1.calibration_data = &calibration_data_11;
4 regs_of_interest_L1.no_of_regs = 0;
5 regs_of_interest_L1.reg_array = reg_list_L1;
6
7 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 VRMS", AVRMS, 4, _signed,
8   voltage, 50);
9 addToRegsOfInterest(&regs_of_interest_L1, "L1 IRMS", AIRMS, 4, _signed,
10   current, 50);
...

```

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 külvilággal 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, μ s-es delay függvényt készítettem.
3. *SPI* Az MCU és az ADE7978 közötti kommunikáció kétféle SPI.
4. *DMA* Az analóg-digitális átalakító kimenetét kezelem DMA-val, így a processzor számára overhead nélkül szolgáltat információt az analóg értékekről.
5. *ADC* A buszfeszültséget, 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 interfész-ként.

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, lassításához, például, hogy valamelyen hiba bekövetkezte után csak néhány másodperc után kapcsoljon le a hiba LED.
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 nullátmennet 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 nullátmennet nélkül állna be egy hibás állapotba, a kiolvastott érték nem tükrözne a valóságot. Ezt kiküszöbölni kivétel kezeléssel lehet, az egyik ciklikus taszk felügyeletével. Amennyiben nem érkezik adott időn belül nullátmennet 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 };
26
27 struct calib_data{
28     float v_lsb;
29     float i_lsb;
30     float wh_lsb;
31     int32_t vgain;
32     int32_t igain;
33     int32_t phcal;
34 };

```

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 mérendő mennyiségi dimenzióját adja meg, mely lehet feszültség, áram, teljesítmény, energia, hőmérséklet, vagy pedig skalár.

A calib_data struktúra tartalmazza az összes, valamilyen kompenzációhoz kapcsolódó értéket. A szeparált tárolás egyszerűvé tette ezeknek az értékeknek a letárolását nemfelejtő memóriába, majd visszaolvasását, illetve fejlesztés alatt, a kalibráció kifejlesztése előtt könnyen át lehetett hidalni, így pedig lehetett használni a kompenzálatlan értékeket.

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.

```
1 struct regs_of_interest_type{  
2     struct meas_register* reg_array;  
3     struct calib_data* calibration_data;  
4     uint8_t no_of_regs;  
5 };
```

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 updateRegsOfInterest(regs_of_interest_L1);  
4 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.



The screenshot shows a terminal window titled "COM11 - PuTTY". The window displays a series of text-based measurements. At the top, it shows system status: "Time up: 0:10:38". Below this, it lists power supply information: "12V supply: 11.14V", "3.3V supply: 3.40V", "MCU temperature 25.0°C", and "Vrefint 1480". The main part of the output consists of three groups of measurements for three phases (L1, L2, L3) and a neutral line (N). Each group includes VRMS, IRMS, POWER, ENERGY, and TEMP values. The measurements are as follows:

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

5.2. 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. CR-WEB

Az alapkészülékben a csomagok megjelenítését, a paraméterezést viszonylag egyszerűen, egy SQL adatbázis megfelelő kitöltésével lehet megvalósítani. Ezután egy CR-WEB elnevezésű, HTML alapú felületen követhetjük az adatok, paraméterek aktuális értékét, kiegészítve olyan, fejlesztéshez és hibakereséshez hasznos információkkal, mint például az adat utolsó keletkezési ideje, illetve beérkezési ideje.

Egy külön fülön a modul állapotát is nyomon követhetjük, valamint kiolvashatjuk a C-CAN-en bekövetkezett hibákat, a kiegészítő modul slave processzorának utolsó resetelésének okát.

Ezek a funkciók fejlesztéshez, mérésekhez rendkívül kényelmesek, az alapkészülék hálózatra való csatlakoztatásával a tényleges kialakítás helyétől távol is figyelemmel követhetjük és vizsgálhatjuk a C-RTU alapú rendszereket.

The screenshot shows the C-RTU Web application running in a browser. The main window displays a table titled 'Adatok' (Data) containing 29 rows of measurement data. The columns are labeled: Id, Tipus (Type), Név (Name), Érték (Value), Keletkezési idő (Creation Time), Beérkezési idő (Arrival Time), and Státusz (Status). The data includes various electrical parameters like current, voltage, and power consumption across three phases (L1, L2, L3).

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	0.00203808 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

5.3. ábra. CR-WEB fejlesztői felület

Egy adat adatbázisba való felvétele az alábbi néhány SQL művelet elvégzésével történik:

```

1 insert into CRMModuleDatas ( moduleTypeId, dataType, ccanChannel, description,
    tag, siUnit) VALUES ('CR-PM3', 'MEASURE', 401, 'L1 fázis feszültség', ,
    'L1_VRMS', 'V');
2
3 insert into CRMModuleParams (moduleTypeId, ccanChannel, paramId, paramType,
    paramValue, description, siUnit) VALUES ('CR-PM3', 299, 3, 'uint32',
    500, 'L1 fázis feszültség küdési ciklusidő (>0 küld)', 'ms');
4
5 insert into CRMModuleParams (moduleTypeId, ccanChannel, paramId, paramType,
    paramValue, description, siUnit) VALUES ('CR-PM3', 299, 4, 'float',
    0.1, 'L1 fázis feszültség küdés szignifikancia (>0 küld)', '');

```

Az első művelet magát a mérendő adat felvételét végzi el típussal, mértékegységgel, leírással, C-CAN csatorna hozzárendeléssel együtt. A második és harmadik SQL utasítás

az előbb felvett adathoz tartozó időzítési kritérium és szignifikancia felvételét végzi el, szintén a megfelelő C-CAN csatorna lefoglalásával. Ezt követően a C-RTU alapkészülék már minden szükséges információval rendelkezik az adatok lekérdezéséhez és folyamatos frissítésére.

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, valamint kalibráció után garantálhatjuk a specifikált pontosságot. Ezen összevont folyamatnál a legjobb megoldás egy végmérő- és kalibrálósoftvert 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 mindössze az előlapon található LED-ek, az összes csatlakozón mérőbemenet található, ezeknek pedig elengedhetetlen a kalibrációja, e közben pedig meggyőződhetünk a helyes működésről.

Mérési környezet

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 az 5.2 táblázatban látható.

A CMC 356 kezelése történhet egy, a gyártó által szolgáltatott, Omicron Harmonics segédprogrammal, vagy pedig vezérelhető távolról, szkriptek futtatásával, melyeket a műszerbe integrált Linux-os számítógép hajt végre a vezérlő utasítások hatására. Sajnos utóbbi implementálására nem volt időm, így csak a valamivel lassabb és nehézkesebb megoldást alkalmaztam, és a segédprogramban írtam át egyesével a feszültség és áramértékek a kalibrációhoz.

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*

STM32 mikrokontrolleren futó szoftver

A mikrokontroller indulás után kétféle inicializációból tud választani, az egyik a normál futáshoz tartozik, míg a másik a kalibrációhoz szükséges inicializációkat végzi el. Ennek a választásnak a megvalósítása a prototípuson a címbeállító kapcsoló egyikének állása alapján volt, azonban a végleges termékben valamilyen kevésbé hozzáférhető megoldást kell majd alkalmazni, hogy normális működés közben semmilyen esetben se lehessen kalibrálást indítani.

A kalibráció különböző lépéseiit C-CAN üzenetek hatására végzi el a CR-PM3, majd az eredményeket letárolja az emulált EEPROM-ba. Normál futás inicializációjakor az EEPROM-ból olvassa ki, és ellenőrzés után tölti be a kalibrációs értékeket.

A C-CAN üzenetek vizsgálata egy beregisztrált kezelő függvényben történik, amely egy dedikált C-CAN csatornára érkező üzenet esetén hívódik meg:

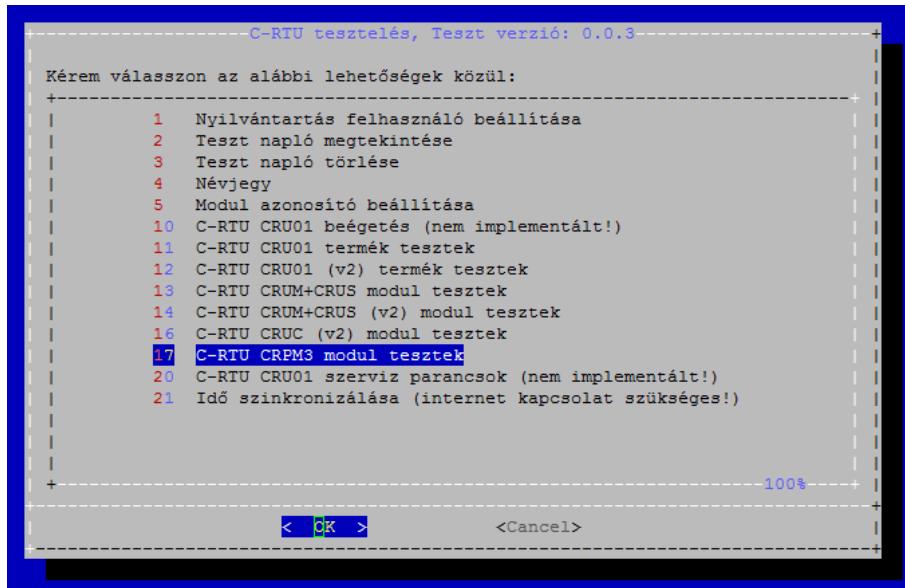
```

1 CHANNEL_ERR_e calibrateHandler(uint16_t channel, uint8_t* data, uint16_t
2   length)
3 {
4     switch(channel)
5     {
6       case 300: //312C
7       {
8         // BEFORE ENTERING THIS SUPPLY 230V, 8A, cosPhi = 1
9         calibrateMeteringIC_VIGainMatching();
10        calibrateMeteringIC_VILSBCalib();
11        break;
12      }
13      case 301: //312D
14      {
15        // BEFORE ENTERING THIS SUPPLY 23V, 0.4A, cosPhi = 1
16        calibrateMeteringIC_VIOSMatching();
17        break;
18      }
19      ...

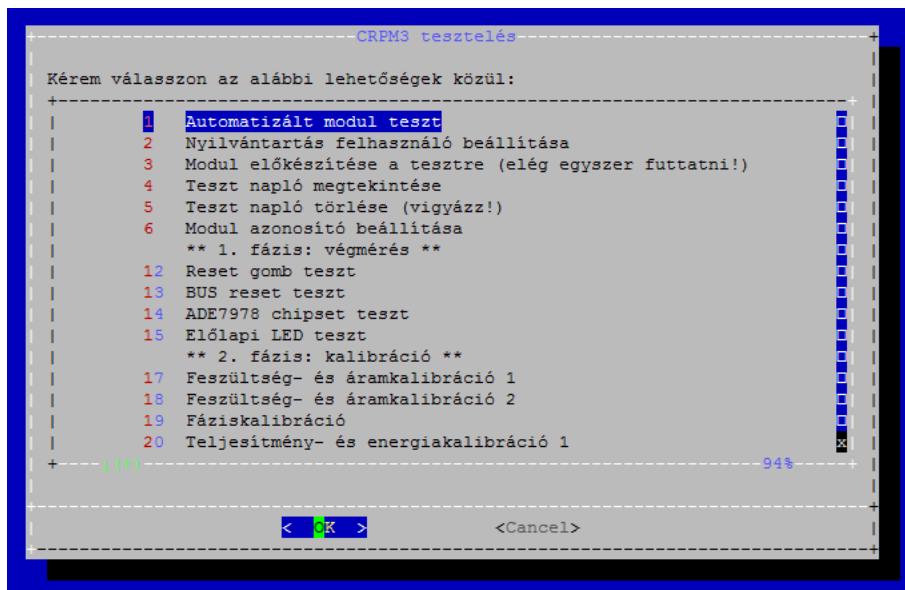
```

Az egyes függvényekben a különböző hibák, illetve azok kompenzációjának kiszámolása és letárolása történik.

Alapkészüléken futó szoftver



5.4. ábra. Végmérő és kalibráló szoftver főmenüje



5.5. ábra. Végmérő és kalibráló szoftver CR-PM3 specifikus menüje

A kontrolleren implementált kalibrációs függvények meghívását kiváltó C-CAN üzeneteket az alapkészülék adja ki. A kalibráció és végmérés elvégzéséhez egy egyszerű program fut

Linux alól, amely egy primitív, de jól átlátható felületet biztosít az összes C-RTU modulhoz, amelynek főmenüje 5.4 ábrán látható. Az egyes menüpontok kiválasztása esetén egy bash script hívódik meg, ebben kell implementálni a további almenüket, üzenetküldéseket és minden további számítást, tárolást.

Egy-egy új modul komponenseinek implementálása egyszerű, a már meglévő részegységek újrafelhasználhatók, mint például a LED-ek, nyomógombok, kapcsolók tesztjei.

A modulhoz tartozó almenüben a végmérés és kalibráció lépéseiit egymás után hajthatjuk végre, illetve rögzíthetjük a különböző készülék paramétereit, mérési adatokat. A modul specifikus almenünek a felépítése a 5.5 ábrán látható.

6. fejezet

Példaalkalmazás

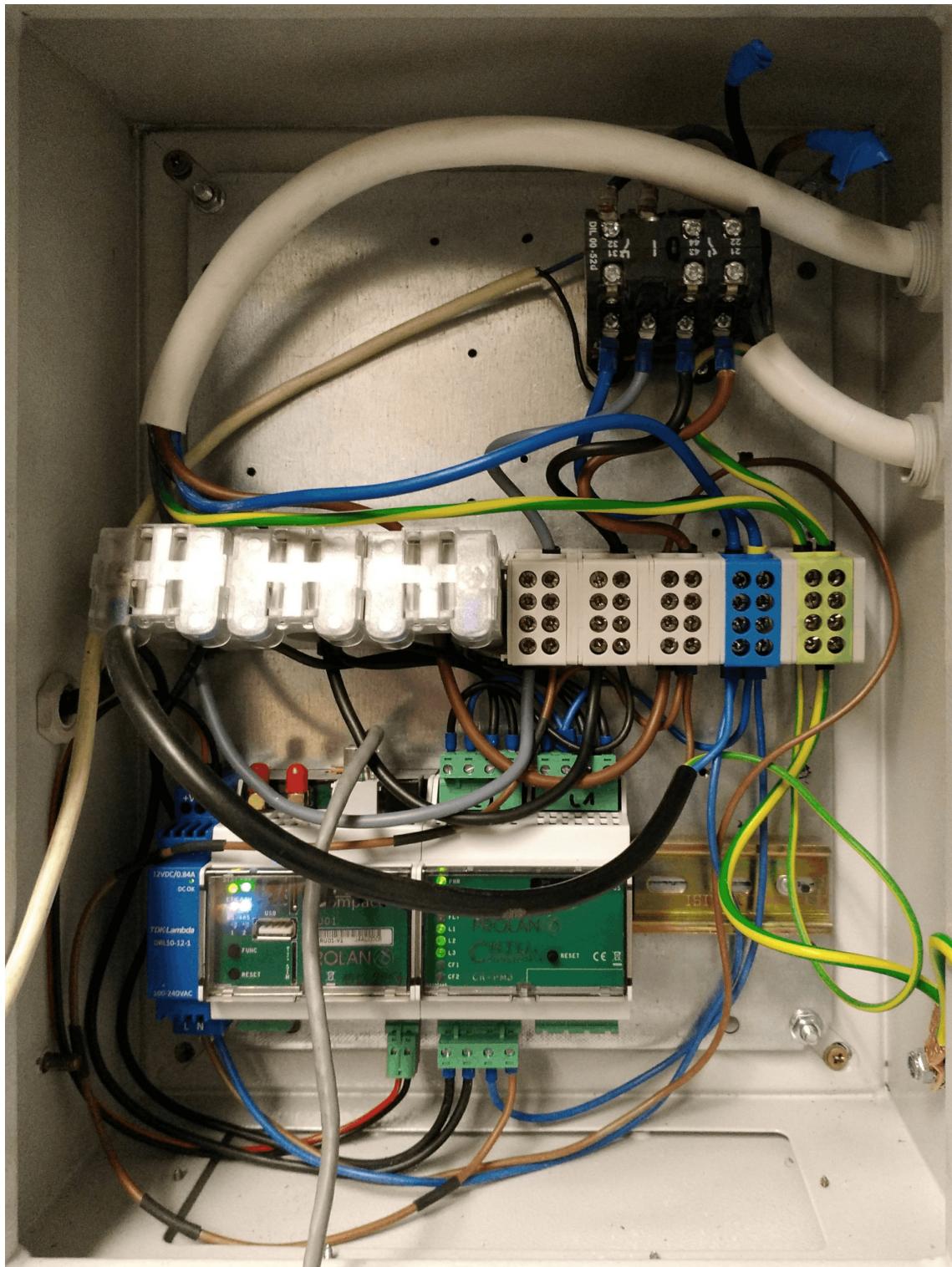
Ősz végére a termék elérte azt a készségi szintet, hogy azt egy példaalkalmazásban kipró-bálhassuk, hogy ott minél több tapasztalatot szerezünk, az esetleges hardver vagy szoftver hibák napvilágot láthassanak.

A CR-PM3-at a Schönherz Zoltán Kollégium Schönherz Elektronikai Műhely (SEM) öntevékeny körének műhelyében szereltem fel, mivel itt található egy CNC marógép, amelynek a marómotorja egy olyan inverterről van járatva, amely képes egy- és háromfázisú működésre is.

A rendszert egy fém készülékszekrényben építettem össze, ügyelve az életvédelmi földelések szakszerű bekötésére. A kialakított rendszer részei a szekrényben a következők:

1. *Háromfázisú mágneskapcsoló*: A rendszerben csak védelmi funkciót lát el, a CNC vészleállító jelére szakítja a háromfázisú tápellátását az inverternek.
2. *Sorkapocs blokkok*: A szakszerű és biztonságos vezetékezés kialakításának érdekében az 5 eres betáplálás ide van bekötve, innen van tovább vezetve a mérőbe, illetve az inverter felé.
3. *Áramváltók*: A betáplálás keresztül van fűzve ezeken, így a műhelyen belüli teljes háromfázisú fogyasztást mérik.
4. *C-RTU rendszer*: Egy C-RTU alapkészülék, valamint egy CR-PM3-as modulból álló rendszer, mely a mért adatokat rezes Ethernethen továbbítja a műhely szervere felé.

Miután tár alá helyeztük a rendszert, illetve a vészleállító oldásával engedélyeztük az inverter tápellátását, a meghajtó jelentős füst kieresztése mellett megszűnt működni. Rövid szerelés után két műhelytársammal a hiba forrását lokalizáltuk, az a háromutas egyenirányítás után elhelyezett 400V-os szűrőkondenzátorok tönkremenetele volt. Miután a kondenzátorokat megfelelő értékűre cseréltük, a meghajtó továbbra sem volt hajlandó működni, bemeneti túlfeszültségre hivatkozva. Az egy fázisra visszakötve az inverter újra működőképes állapotba került. Sajnos a Kínában gyártott, olcsó inverter így nem volt alkalmas



6.1. ábra. *CR-PM3-as rendszer szerelés közben a Schönherz Elektronikai Műhelyben*

a háromfázisú terhelésre, a tényleges működést csak egy fázisú teljesítmény méréssel, háromfázisú feszültségméréssel tudtam ellenőrizni.

Az inverter indítása után, valamint megvárva a stacioner állapot elérését a fázisfeszültség 232.5V, az áram pedig 0.817A lett. A CR-PM3 által mért értékek a CR-WEB felületen

keresztül egyszerűen kiolvashatóak voltak, azonban egy tényleges felhasználáshoz a mérési adatok valamilyen naplózásának implementálása szükséges.

Összefoglalás

TODO

Köszönetnyilvánítás

TODO

Ábrák jegyzéke

1.1.	Aktív PFC felépítése	9
1.2.	ENTSO-E tagállamok [4]	10
1.3.	Hosszú kímaradások ideje évente [5]	12
2.1.	C-RTU család moduljai	14
2.2.	C-RTU alapkészülék	15
3.1.	Lineáris optocsatolós analóg jel leválasztás [10]	20
3.2.	Áramváltó transzformátor működési elve	21
3.3.	Rogowski-tekercs [11]	22
3.4.	Négy kivezetéses árammérő sönt [12]	22
3.5.	Kompenzált Hall-szenzoros árammérő fluxus koncentrátorral [13]	23
3.6.	Rendszer felépítése	26
4.1.	RT7285/A alapú kapcsolóüzemű tápegység	31
4.2.	Az áramméréshez tartozó bemeneti áramkör	34
4.3.	Átlapolódás jelensége az ADC bemenetén [15]	35
4.4.	A feszültségméréshez tartozó bemeneti áramkör	35
4.5.	RT7285 alapú tápegység NYÁK terve	38
4.6.	CR-PM3 mérő bemeneteinek NYÁK terve	38
4.7.	Szigeteléskoordináció MSZ EN 60664-1 alapján [20]	40
4.8.	EMC vizsgálatok osztályzása	41
4.9.	Emisszió csökkentése integrált izolált táp esetén [22]	44
4.10.	ESD teszt csatoló síkokkal	45
4.11.	Burst és surge teszt mérési összeállítása	46
4.12.	Szimulátor beállításai és mért értékei surge teszt alatt	47
4.13.	Vezetett RF zavarok méréseihez használt eszközök	47
4.14.	CR-PM3 összeállítása	49
4.15.	CR-PM3 a készülékházban	50
5.1.	STM32 ST-LINK Utility LiveUpdate opcióval	53
5.2.	Debug soros port kimenete	58
5.3.	CR-WEB fejlesztői felület	59
5.4.	Végmérő és kalibráló szoftver főmenüje	62
5.5.	Végmérő és kalibráló szoftver CR-PM3 specifikus menüje	62

6.1. CR-PM3-as rendszer szerelés közben a Schönherz Elektronikai Műhelyben	65
F.0.2.CR-PM3A és CR-PM3C beültetési rajzai	75

Táblázatok jegyzéke

1.1.	MSZ EN 61000-4-30 által támasztott követelmények [3]	11
3.1.	AF500 ProField modul specifikációja	18
3.2.	Feszültségmérési megoldások	21
3.3.	Árammérési megoldások [14]	23
3.4.	16451-es áramváltó transzformátor pontossága terhelés függvényében	26
3.5.	ADE7978 tipikus pontossági értékei 0.1%-os alkatrészek alkatrészek alkal-mazásával	27
4.1.	RT7285/A fontosabb jellemzői	31
4.2.	MSZ EN 62052-11:2003 által támasztott EMC immunitási követelmények [24]	45
5.1.	EEPROM és emulált EEPROM összehasonlítása 32 bites adatokon	52
5.2.	Omicron CMC 356 specifikációja háromfázisú konfigurációban	61

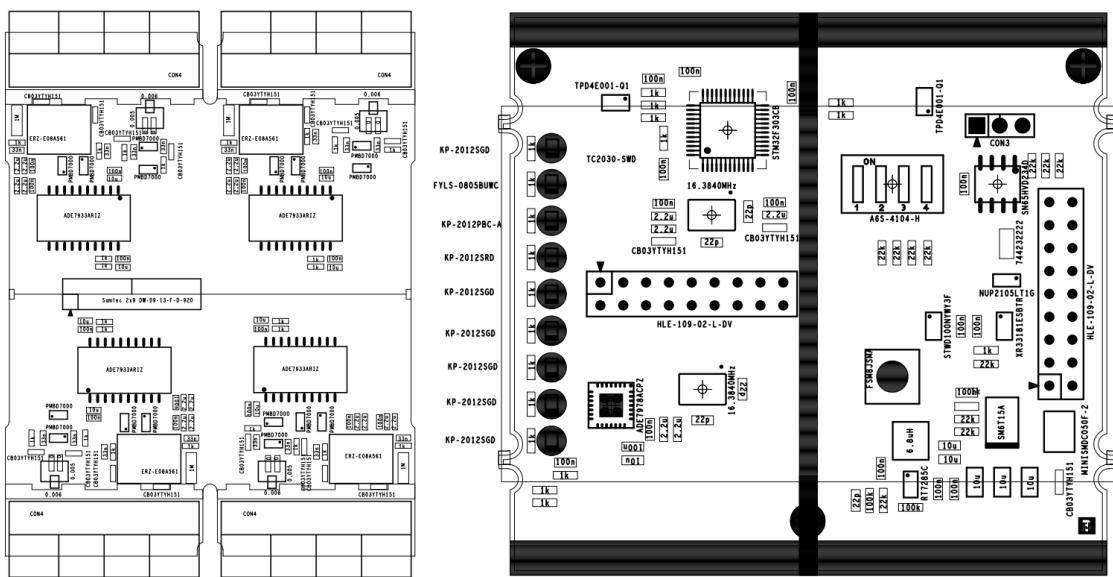
Irodalomjegyzék

- [1] MSZ EN 1:2002, Szabványos villamos feszültségek. Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 01 2002.
- [2] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 3-2. rész: Határértékek. A felharmonikus áramok kibocsátási határértékei (fázisonként legfeljebb 16 A bemenőáramú berendezésekre) (IEC 61000-3-2:2014). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 12 2014.
- [3] Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 4-30. rész: Vizsgálati és mérési módszerek. A hálózati feszültség minőségének mérési módszerei (IEC 61000-4-30:2015). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 08 2015.
- [4] ENTSO-E. Our Members (2018.12.14.). <https://docstore.entsoe.eu/Pages/default.aspx>.
- [5] CEER 6th Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply. Jelentés, Council of European Energy Regulators (CEER), 09 2016.
- [6] Prolan Zrt. Kompakt mérésadatgyűjtő, vezérlő rendszer (C-RTU) (2018. november 25.). <http://www.prolan.hu/hu/megoldasok/CRTU>.
- [7] Tag-Connect. TC2030-MCP 6-Pin Cable with RJ12 Modular Plug (for Microchip ICD). <http://www.tag-connect.com/TC2030-MCP>.
- [8] Phoenix Contact. BC moduláris készülékházak. https://www.phoenixcontact.com/online/portal/hu?1dmy&urile=wcm:path:/huhu/web/main/products/subcategory_pages/Modular_housings_BC_P-01-12-02/3a371abc-34e5-438f-a723-d2ab8e20eaa1.
- [9] Prolan Zrt. RTU (Profield) (2018. december 14.). <http://www.prolan.hu/megoldasok/ProField-RTU>.
- [10] Dr. Varjas István (BME-AUT). Készüléktervezés jegyzet: 11. Érzékelők. https://www.aut.bme.hu/Upload/Course/VIAUMA14/hallgatoi_segedletek/K%C3%A9sz%C3%BCl%C3%A9ktervez%C3%A9s_%C3%89rz%C3%A9kel%C3%A9s.pdf.
- [11] Janitza. Rogowski coils. <https://www.janitza.com/rogowski-coils-janitza.html>.

- [12] Vishay. WSL4026 PRODUCT INFORMATION. <http://www.vishay.com/ppg?30132>.
- [13] Infineon. Current Sensing Using Linear Hall Sensors. https://www.infineon.com/dgdl/Current_Sensing_Rev.1.1.pdf?fileId=db3a304332d040720132d939503e5f17.
- [14] Arek Kacprzak. Six ways to sense current and how to decide which to use. https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/archive/2015/07/10/six-ways-to-sense-current-and-how-to-decide-which-to-use.
- [15] ADE7978/ADE7933/ADE7932/ADE7923. Datasheet, Analog Devices, 11 2018.
- [16] 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/>.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] RT7285 Datasheet. Datasheet, Richtek, 10 2014.
- [20] MSZ EN 60664-1:2008, Kisfeszültségű rendszerek villamos szerkezeteinek szigeteléskoordinációja. 1. rész: Alapelvek, követelmények és vizsgálatok (IEC 60664-1:2007). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 05 2008.
- [21] EM TEST (Switzerland) GmbH. The structure of EMC standards (2018. november 12.). http://www.emtest.com/what_is/standards.php.
- [22] 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>.
- [23] AN-1333, Architecting a Direct, 3-Phase Energy Meter with Shunts Using the ADE7932/ADE7933/ADE7978. Application note, Analog Devices, 2014.
- [24] Váltakozó áramú villamos fogyasztásmérő berendezések. Általános követelmények, vizsgálatok és vizsgálati feltételek. 11. rész: Fogyasztásmérő berendezések (IEC 62052-11:2003). Szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 09 2003.
- [25] 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.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Samtec. DW .100 Flex Stack, Flexible Board Stacker. <https://www.samtec.com/products/dw>.
- [29] Samtec. HLE .100 Tiger Beam Cost-effective Single Beam Socket Strip. <https://www.samtec.com/products/hle>.
- [30] Bivar. Bivar PLP2 light pipe. <https://www.bivar.com/portals/0/products/PLP2-XXX.pdf>.

Függelék



F.0.2. ábra. CR-PM3A és CR-PM3C beültetési rajzai



CRPM3 háromfázisú teljesítményminőség mérőmodul



A készülék leírása

A Prolan Zrt. C-RTU termékcsaládjának része a CR-PM3 háromfázisú teljesítményminőség mérőmodul.

A modul négy galvanikusan független csatornán képes feszültség és áram mérésére, illetve ezekből számolni a hálózati jellemzőket.

A modul elsősorban a KIF hálózat paramétereinek kihelyezett vizsgálataihoz készült, azonban megfelelő illesztéssel más helyeken is alkalmazható.

Mérési elv

A CR-PM3 egy DSP alapú, csatornánként (fázisonként) izolált feszültség- és árammérő.

A feszültségmérés nagyfeszültségű ellenállásosztón keresztül történik.

Az árammérés a készüléken belüli, alacsony ellenállású söntön eső feszültség mérésével van megoldva, ezzel lehet a külső áramváltót zárni.

Az árammérés megvalósítható áramváltó nélkül is, egy külső sönt használatával a csatornánkénti izolációnak köszönhetően.

A mérési eredményekből a DSP előállítja a pontos hálózati jellemzőket, mint például:

- RMS feszültség- és áramértékek
- Hatásos, meddő, látszólagos és komplex teljesítmények
- Feszültség és áram THD-k
- Fázisszögek
- Fázisok frekvenciája

A jellemzők mellett a CR-PM3 a hálózati események detektálására is alkalmas, így képes jelezni a túlfeszültségeket, illetve a feszültségbeeséseket.

A mérések a hálózati nullátmenetekre vannak szinkronizálva.

Bemenetek leírása

A CR-PM3 AD bemenetei izoláltak a CR-busztól, és így a C-RTU rendszer többi moduljától.

Egy csatorna jellemzői:

- Feszültség mérésnél kb. $1.1\text{ M}\Omega$ -al terheli a mért fázist
- Árammérés esetén a sönt $5\text{m}\Omega$ -os értékkel kell számolni

Rendszerbe integrálás, paraméterezés

A modul működtetéséhez C-RTU processzor modul szükséges.

A készülék a CR-buszra kapcsolódik, tápellátását is innen kapja.

Egy buszra legfeljebb 16 db modul csatlakoztatatható.

Az előlapról leolvasható a modul állapota, a CR-buszon történő kommunikáció és a tápellátás megléte.

A modul kialakítása lehetővé teszi a tápfeszült-ség alatti cserét (hotswap).

Műszaki adatok	
Működési hőmérséklet	-25°C ÷ 70°C
Tápellátás	CR-busz táplálású (12V), hotswap
Teljesítményfelvétel	< 1 W
Készülék méretei	Lásd a méretrajzot
EMC termékszabvány	MSZ-EN 61131-2, MSZ EN 62052-11
Előlapi funkciók	
Power LED	ZÖLD, a készülék belső tápellátását mutatja
Státusz LED	ZÖLD, a processzor állapotát mutatja
Fault LED	PIROS, hiba állapotot jelez
Busz LED	SÁRGA, a busz aktivitást jelzi
RESET gomb	Újraindítja a bővítőmodult
Cím kapcsoló	Az eszköz címének beállítására szolgál
Analóg bemenetek tulajdonságai	
AD konverter tulajdonságai	
AD típusa	$\Sigma\Delta$
AD felbontása	24 bit
Trigger	nullátmenet, vagy aszinkron ennek hiányában
Kalibráció szükségessége	Igen
Nemlinearitás	<0.25%
Számábrázolás	lebegőpontos
Beállási idő	< 1000 ms
Új adat előállítási idő	50 hálózati periódusonként alapértelmezetten, de konfigurálható
AD bemenetek tulajdonságai	
Bemenetek konfigurációja	csatornánként egy-egy külön AD feszültségre, áramra, hőmérsékletre
Csatornák védelme	MOV
Javasolt kábelezés	csavart érpár, max. 30 m
Max. tartós áram (elviselt)	14Arms (áram bemeneten)
Max. tartós feszültség (elviselt)	450Vrms (feszültség bemeneten)
Szigetelési lökőfeszültség	5 kV az analóg bemenetek és a CR-busz között
Bemeneti szűrés	Elsőrendű
Szűrés határfrekvenciája	4.82kHz
Max. paraméter eltérés zavartatás alatt	<5%

Feszültségmérés jellemzői	
Mérési értékhatár	350Vrms
Bemeneti impedancia	1.1 MΩ differenciális
Feszültségmérés pontossága	350Vrms...0.7Vrms tartományon $\pm 0,1\%$ -a 25 °C-on
Hőmérsékleti együttható	$< \pm 25 \pm 25$ ppm/K
LSB érték	29.8µV
Reprodukálhatóság	kidolgozás alatt
Árammérés jellemzői	
Mérési értékhatár	4.42Arms
Bemeneti impedancia	5mΩ, közösmódusú
Árammérés pontossága	4.42Arms...8.84mArms tartományon $\pm 0,25\%$ -a 25 °C-on
Hőmérsékleti együttható	$< \pm 15$ ppm/K
LSB érték	0.373 µA
Reprodukálhatóság	kidolgozás alatt
Csatlakozó típusok	
Bemeneti csatlakozó típus	Degson Electronics 2EDGRC-7.5-04P