



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

## DIPLOMATERV-FELADAT

**Tóth Eszter (FL3DPR)**  
szigorló villamosmérnök hallgató részére

# Vezeték nélküli okosmérőóra-hálózat hardver elemeinek tervezése

A dolgozat a vezeték nélküli szenzorhálózatok egy speciális alkalmazási területével foglalkozik. A meglévő okos mérőóra technológiákban központosított infrastruktúrát használnak. A robusztusság, illetve a lefedettségi terület növelése érdekében kézenfekvő megoldás lehet a vezeték nélküli hálózati megoldások használata.

Az okos mérőórák (SmartMeter) alkalmazásának egyik lehetséges módja, ha az okos mérőórák rádiós kommunikációs kapcsolaton alapuló szenzorhálózatot alkotva működnek. Ennek elsődleges felhasználási területe a sok lakásos társasházak és tömbházak. A dolgozat célja egy mérőórákból kialakított kísérleti vezeték nélküli okosmérőóra-hálózat teljes körű hardvertervezése és implementációja.

A kísérleti rendszer alapvetően két fő részből áll, a mérőórák mellé telepítendő kommunikációs modulokból és egy központi gateway egységből, amely a vezeték nélküli hálózat központi eleme. Továbbá a gateway biztosítja a kapcsolatot a külvilág (távoli szerver) felé. A vezeték nélküli hálózatban az előírt rádiós kommunikációs szabvány a WMBUS.

A hallgató feladata a rendszer magas szintű feature specifikációja alapján az összes szükséges hardver elem megtervezése. A kommunikációs modulok telepről is képesek működni és lehetőleg kis méretűek. A gateway egy ARM Cortex A architektúrájú vagy ekvivalens, de ennél nem kevésbé komplex processzorra épül, amely alkalmas beágyazott Linux vagy Android operációs rendszer futtatására és a lokális rádiós hálózat menedzselésére, valamint biztosítja a GSM kapcsolatot távoli szerver felé.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- Tekintse át a vonatkozó tudományos irodalmat a vezeték nélküli hálózatok hardver megoldásainak körében, és elemezze a lehetséges megoldásokat a konkrét alkalmazás szempontjai alapján!
- Készítse el a hardver elemek mérnöki specifikációját, beleértve a megfelelő alkatrészek és a nyomtatott áramkör gyártási technológiai paraméterek kiválasztását!
- Készítse el az eszközök kapcsolási rajzát és nyomtatott huzalozási tervét!
- Élessze fel a legyártott eszközöket, demonstrálja a működést!

**Tanszéki konzulens:** Orosz György, adjunktus

**Külső konzulens:** Molnár Károly, ProDSP Kft.

Budapest, 2016. március 18.

.....  
Dr. Dabóczy Tamás  
tanszékvezető



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

# Vezeték nélküli okosmérőóra-hálózat hardver elemeinek tervezése

DIPLOMATERV

*Készítette*

Tóth Eszter

*Konzulens*

Molnár Károly

Dr. Orosz György

2016. december 9.

# Tartalomjegyzék

<b>Kivonat</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Bevezető</b>	<b>6</b>
<b>1. Vezeték nélküli hálózatok hardveres megoldásai</b>	<b>8</b>
1.1. ISM rádió . . . . .	8
1.2. ZigBee . . . . .	9
1.3. Z-Wave . . . . .	11
1.4. DASH7 . . . . .	13
1.5. Wireless M-Bus . . . . .	14
1.6. Összegzés . . . . .	16
<b>2. Rendszerterv</b>	<b>18</b>
<b>3. A feladat hardveres egységekre bontása</b>	<b>20</b>
3.1. A kommunikációs egység . . . . .	20
3.2. A központi egység . . . . .	21
3.2.1. GSM kártya . . . . .	21
3.2.2. Processzoros kártya . . . . .	22
3.2.3. Interfészkártya . . . . .	23
<b>4. A wM-Bus kártya tervezése</b>	<b>24</b>
4.1. Kapcsolási rajz tervezése . . . . .	24
4.2. Nyomtatott áramkör tervezése . . . . .	29
<b>5. A GSM kártya tervezése</b>	<b>33</b>
5.1. Kapcsolási rajz tervezése . . . . .	33
5.2. Nyomtatott áramkör tervezése . . . . .	36
<b>6. A processzoros kártya tervezése</b>	<b>37</b>
6.1. Processzorválasztás . . . . .	37
6.2. Kapcsolási rajz tervezése . . . . .	39
6.2.1. Külső RAM kiválasztása, bekötése . . . . .	39

6.2.2.	Tápfeszültségek előállítása . . . . .	43
6.2.3.	Külső Flash választása, bekötése . . . . .	46
6.2.4.	BOOT mód választás . . . . .	47
6.3.	Nyomtatott áramkör tervezése . . . . .	48
6.3.1.	Rétegfelépítés kiválasztása és impedancia-kalkuláció . . . . .	48
6.3.2.	Huzalozás . . . . .	53
6.3.3.	Gyártásra való előkészítés . . . . .	57
<b>7.</b>	<b>Az interfészkártya tervezése</b>	<b>60</b>
7.1.	Kapcsolási rajz tervezése . . . . .	60
7.2.	Nyomtatott áramkör tervezése . . . . .	63
<b>8.</b>	<b>Élesztés, tesztelés</b>	<b>65</b>
<b>9.</b>	<b>Összefoglalás</b>	<b>67</b>
	<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>69</b>
	<b>Ábrák jegyzéke</b>	<b>71</b>
	<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>73</b>

## HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Tóth Eszter*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot 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, 2016. december 9.

---

*Tóth Eszter*  
hallgató

# Kivonat

A mai világban jellemző irányvonal a vezeték nélküli kommunikációs megoldások egyre elterjedtebb használata. A korábbi vezetékes kommunikációs technológiákat sok területen fokozatosan felváltják a vezeték nélküliek, illetve olyan eszközök is könnyen és olcsón kommunikációs hálózatba kapcsolhatók, amelyeknél korábban ez nem volt jellemző. Egy mai okos-otthonban (smart home) már a háztartási gépektől kezdve a lámpakapcsolókig minden eszköz egy vezeték nélküli hálózat részét képezi. Ezek a hálózatok vezérlési és monitorozási funkciókat is ellátnak. Ezek alapján logikus elképzelés, hogy a fogyasztásmérő órákat is vezeték nélküli hálózatokba szervezzük, megkönnyítve ezzel a szolgáltatók munkáját is a távoli leolvashatóság lehetőségével. Emellett a felhasználó is valós adatokat kap a saját fogyasztási szokásairól. Világszerte léteznek már olyan smart meter projektek, amelyek mérőórák távoli leolvasását végzik, viszont nincs még kialakult egységes szabványrendszer ezen a területen, emiatt kompatibilitási problémák lépnek fel.

Diplomamunkám során egy olyan kísérleti vezeték nélküli okos mérőóra-hálózat hardver elemeinek megvalósítása volt a feladatom, amely azonos interfészt teremt a különböző mérőóráknak. A rendszer kétféle hardverből épül fel, a mérőórák mellé telepítendő kisebb kommunikációs egységekből, illetve a hálózat központi elemét képező adatkoncentrátor és gateway szerepet betöltő egységből. Az előbbiből sok szerepel egy hálózatban és fő feladatuk a mérőórákból kiolvasott adatok elküldése a központi egységnek a rádiós csatornán keresztül. A központi egység menedzseli ezen adatok gyűjtését és továbbítását egy szerverre, amely a szolgáltatót reprezentálja.

Dolgozatomat egy vezeték nélküli kommunikációs protokollokat bemutató és összehasonlító irodalomkutatási fázissal kezdem. Majd a részletes specifikáció kidolgozásával folytatom, amely alapján felbontom a feladatot funkcionális részegységekre. Ezen funkciók megvalósítására egy-egy külön hardvert tervezek, amelyek teljes tervezési folyamatát bemutatom. Ennek főbb lépései a következők: alkatrészek kiválasztása, kapcsolási rajz tervezés, nyomtatott áramkör tervezés és végül a gyártás. A dolgozat végén a legyártott eszközök sikeres élesztését és az alapvető funkciók tesztelését mutatom be.

# Abstract

Nowadays it is a typical trend to use more and more wireless communication systems. The former wired communication technologies are gradually replaced with wireless solutions in many applications, since there are low-priced devices, that we can easily connect to each other in a communication network, but they were not used in wireless systems a few years ago. Today in a smart home almost all the electronic devices are part of a wireless network, from the household appliances to the simple light switches. These networks perform controlling and monitoring functions too. It is an evident idea to organize the meters in a wireless network, which can facilitate the work of the utility companies with the possibility of remote meter reading. Furthermore the customers can get real datas of their consumer habits. There are smart meter projects worldwide, that make the remote reading of the meters, but unified standards are missing and compatibility problems can occur.

In my thesis I had to design and develop the hardware elements of a wireless smart meter network, that provides the same interface to the different types of meters. The system consists of two main type of hardware: smaller communication modules, which are installed next to the meters, and a gateway module, which is the concentrator of the network. A large number of communication modules can be found in a network, and their main function is to send the read measurement datas to the gateway through the radio link. The gateway unit manages the collection and transmission of these datas to a server, which represents the utility company.

I start my thesis with a survey in the subject of wireless communication protocols and their comparison. Then I continue with the development of the detailed specification, and I describe the specification for the functional subsystems. I implement these functions on separate boards and present the entire design process of each unit. The main steps of designing a hardware are as follows: component selection, schematic design, PCB (Printed Circuit Board) design and the production of the PCB. After the successful power-up tests on the manufactured boards, I present the testing methods of the basic features.

# Bevezető

Manapság egyre több országban terjednek az okos fogyasztásmérő-órák, ezért röviden bemutatom, hogy miben térnek el, mennyivel nyújtanak többet, mint a mindenki által ismert hagyományos mérőórák. A hagyományos mérőórák alatt a minden háztartásban megtalálható, jellemzően még analóg számlálós mérőórákat értem, legyen az villany-, gáz- vagy vízóra. Ezek leolvasása általában a szolgáltató munkatársai által manuálisan történik, melynek több hátránya is van. A számla kiállításához a szolgáltatónak szüksége van az óra állására, melyet jobb esetben a felhasználó valamilyen felületen keresztül bediktálhat. Ezzel a módszerrel sok visszaélés történik, ezért nem is kap valós képet a szolgáltató a fogyasztói szokásokról. Továbbá a szolgáltató munkatársainak legalább évente egyszer személyesen is el kell mennie minden órához leolvasásra. Ennek egyik hátránya, hogy a mérőórák nagy része lakáson belül van elhelyezve, így a fogyasztónak otthon kell lennie, amikor az óraleolvasó személy érkezik.

Ezen problémák, nehézségek mindegyikére megoldást nyújtanak az okos mérőórák, és ezeken túl még számos előnnyel rendelkeznek. Legfontosabb tulajdonságuk a távolról történő leolvashatóság, ezzel elkerülve a manuális helyi leolvasást. Ehhez alapvetően szükséges funkció, hogy valamilyen digitális formátumban legyenek képesek előállítani a mérési adatokat. Ezeket az adatokat el kell juttatni a szolgáltatóhoz valamilyen vezetékes- vagy vezeték nélküli csatornán keresztül. A távleolvasás legfőbb előnye, hogy bármikor, bármilyen rendszerességgel megtörténhet. Ez már azt a lehetőséget biztosítja a szolgáltatónak, hogy akár folyamatosan is monitorozza az egyes lakások fogyasztását. Ez nyilvánvalóan rengeteg adat továbbításával és tárolásával járna együtt, mellesleg nem is bírna jóval több információ-tartalommal, mintha csak óránként egyszer kerülnének leolvasásra az adatok. A mérési adatok biztonságos kezelése nagyon fontos feladat, hiszen azokat csak a felhasználónak és a szolgáltatónak áll jogában ismerni. Adatok illetéktelen kézbe kerülése esetén a rosszindulatú támadó tudomást szerezhet a háztartásban történő eseményekről, kiderítheti, hogy mikor nem tartózkodik otthon senki. Ez ellen megoldás lehetne a napi egyszeri mérőállás rögzítés, viszont ezzel a megoldással az az előny veszne el, hogy a különböző napszakok eltérő díjszabását figyelembe lehessen venni. Tipikusan ilyen opció szokott lenni az éjszakai áramfogyasztás.

A világon már kiépített okos mérőórás rendszerekben is ez az egy óras, esetleg fél óras felbontás a jellemző. Ezek a lehetőségek már alapvetően hiánypótlóak a hagyományos mérőórákhoz képest és sok problémára megoldást nyújtanak, de lehet még komolyabb funkciókat is integrálni egy ilyen rendszerbe. Adódik, hogy ha már kiépült a kommunikációs



csatorna a fogyasztó és a szolgáltató között, akkor a másik irányba is küldhetők adatok, tehát a szolgáltató felől a felhasználó felé. Ez lehetővé teszi a távoli beavatkozást is, ha erre alkalmas mérőórák vannak a rendszerben. A háztartásban található olyan eszközök, amelyeknek nem kritikus, hogy mikor működnek, ezek be- és kikapcsolását például lehet a szolgáltatóra bízni. Persze ennek megvalósításához a háztartáson belül egyéb "okos" eszközöknek is jelen kell lennie, ezért erre nem térek ki részletesebben, csak mint lehetőség említettem.

Az okos mérőórák nem csak a szolgáltató munkáját könnyítik meg, hanem hasznosak lehetnek a fogyasztók számára is. Könnyen megvalósítható, hogy otthonukban ők is lássák az aktuális fogyasztási adataikat, valamint statisztikákat az előző időszakokban történő fogyasztásokról. Továbbá a felhasználó minden esetben a tényleges fogyasztás alapján fizetne, nem lenne lehetőség átalányszámítás miatti alul- vagy túlfizetésre.

Logikus lépés a fizikailag egymáshoz közel eső mérőórákat egy kommunikációs hálózatba kapcsolni, és adataikat tömbösítve továbbítani a szolgáltató felé, így nem kell minden óra mellett külön olyan eszközt elhelyezni, amelyik képes önállóan távoli szerverrel közvetlenül kommunikálni, elegendő egy közös gateway használata az egész hálózatnak. Ez a megoldás költséghatékonyság szempontjából is előnyös, mivel kevesebb hardvert kell telepíteni. A mérőórák hálózatba integrálása történhet vezetékes vagy vezeték nélküli kommunikációs módszerek segítségével egyaránt. Egy vezetékes kommunikációs hálózat kevesebb eszközt tud befogadni, és egy új eszközzel való bővítés is problémásabb feladat. Sűrűn lakott területeken, tömbházak esetében kézenfekvőbb megoldás a mérőórák vezeték nélküli hálózatba kapcsolása. Ez megtehető, mert a hatótávolságok hosszabbak lehetnek, mint az órák távolsága. Egy vezeték nélküli hálózatban egy új eszköz bekapcsolása egyszerűbben kivitelezhető, illetve egy esetleges kiesés kezelése is dinamikusabban megtörténhet. Ez a rendszerkialakítás felfogható úgy is, hogy a mérőórák egyfajta szenzorhálózatot alkotnak. Ehhez arra van szükség, hogy a mérőórák valamilyen egységes kommunikációs interfésszel rendelkezzenek. Ez úgy oldható meg, hogy minden egyes óra mellé telepíteni kell egy kommunikációs modult, amely kiolvassa a mérési adatokat és képes az adott szenzorhálózaton azt továbbítani egy központi egység felé. A központi egység egyrészt a szenzorhálózatban az adatkoncentrátor szerepét tölti be, másrészt átjáróként (gateway) üzemel a rádiós szenzorhálózat és a szolgáltató felé használt hálózat között.

A dolgozatomban egy ilyen rendszer megvalósításához szükséges hardver elemek specifikációját, majd az alapján történő megtervezését mutatom be. Az első fejezetben ismertetek néhány olyan vezeték nélküli hálózatot, amelyek alkalmasak lehetnek vezeték nélküli szenzorhálózatok felépítésére, illetve ezekhez milyen hardveres megoldásokra van szükség. A második fejezetben felvázolom a rendszertervet, a harmadikban pedig a rendszerterv alapján felbontom a feladatot kisebb egységekre. A 4., 5., 6. és 7. fejezetben bemutatom az egyes hardverek tervezési folyamatát a részletes specifikációtól a hardver gyártásáig. A 8. fejezetben pedig a legyártott áramkörök élesztési, tesztelési folyamatát mutatom be.

## 1. fejezet

# Vezeték nélküli hálózatok hardveres megoldásai

Ebben a fejezetben néhány vezeték nélküli kommunikációs protokollt mutatok be, amelyek alkalmasak lehetnek a feladatom megvalósítására. Leírom, hogy milyen hardveres megoldásokkal lehet megvalósítani az adott kommunikációs protokollt.

### 1.1. ISM rádió

Vezeték nélküli kommunikációs hálózatok megvalósításánál lehetséges opció, hogy nem egy konkrét szabvány szerint működő kommunikációt valósítunk meg. Ebben az esetben egy általános célú, valamely ISM sávban működő rádiós integrált áramkör vagy kész modul alkotja a hálózat egyes elemeit. Ilyen rádiós modulokból nagyon széles a választék a piacon. Jellemzően a 433 MHz, a 868 MHz vagy a 2.4 GHz körüli frekvenciasávokat használják az Európába szánt változatok. Általában nem csak egy konkrét frekvencián képesek működni, hanem több csatorna közül választhatunk, ezzel elkerülve, hogy a közelben működő azonos ISM sávot használó modulok zavarják egymás kommunikációját. Ezzel a lehetőséggel nem csak rajtunk kívülálló forrásból érkező zavaró üzenetek ellen tudunk védekezni, hanem akár a saját rendszerünk tagjait is tudjuk szeparálni egymástól.

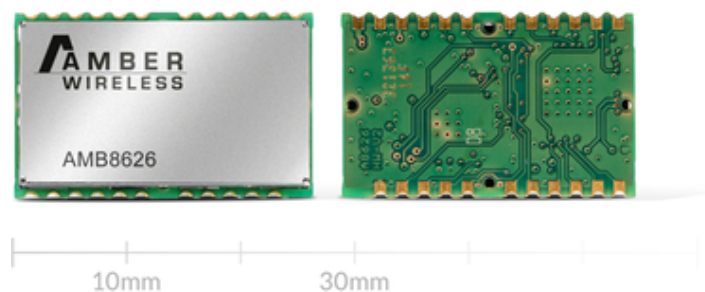
Az ilyen általános célú rádiós modulok nagy része, főleg az olcsó típusok, jellemzően nem rendelkeznek semmilyen komolyabb protokoll stackkel, szoftver támogatással. Ez egyben a legnagyobb hátrányuk is, mert a teljesen saját protokoll stack fejlesztése rengeteg időt igényel, amellyel a termék teljes fejlesztési ideje nagyon megnövekedik. Néhány népszerű modul kezeléséhez található az interneten mások által megírt kódok, de ezek általában konkrét processzorarchitektúrákra vannak implementálva. Ha nincs jól szétválasztva a processzor-specifikus alacsony szintű kód a magasabb szintű kezelőfüggvényektől, akkor elég nehézkes feladat a kód másik processzorra való implementálása.

Emiatt az ilyen saját fejlesztésű firmware-rel működő rádiós hálózatok alkalmazási köre jellemzően az egyszerűbb pont-pont kapcsolatú kommunikációkra terjed ki. Gyakran használják ezeket távirányítós alkalmazásokra, ahol ritkán és kevés adat átküldésére van szükség. A diplomatémám esetében egy komplexebb topológiájú hálózat felépítésére van

szükség, ahol sok egység kommunikál egymással. A hálózat felépülésének önszerveződőnek kell lennie, tudnia kell kezelni intelligensen egy egység kiesését. Egy új egység hozzáadása a hálózathoz is gyakori feladat. Egy ilyen komplex firmware megírása bonyolult és időigényes feladat, nem lehet kihasználni a modul olcsóságát előnyként, mivel a fejlesztési költségek jelentősen megnövekednek. Ráadásul egy új protokoll tesztelése is sok időt vesz igénybe.

Néhány gyártó azonban mégis kínál beépített protokoll stackkel ellátott modulokat, főként a vezetékes soros kommunikációs protokollok kiváltására. A Telit gyártó az LE50-433/868 típusú moduljait [1] kifejezetten az RS485 fizikai rétegen megvalósított Profibus és Modbus protokoll vezeték nélküli helyettesítőjének megvalósítására ajánlja. Ezenkívül alkalmas bármilyen csillag topológiájú hálózat kialakítására, valamint hosszú láncokat tartalmazó hálózat is kiépíthető a "smart repeater" funkciójának köszönhetően. Képes periodikus ébredésre és AES128 titkosító egység is található benne, mindkét funkció követelménye a diplomatervezés során megvalósítandó rendszernek. Továbbá alacsony fogyasztása is előnyös a mérőórás hálózatban történő alkalmazása szempontjából.

Az Amber Wireless egy másik gyártó, amely egészen hasonló megoldásokat kínál saját szoftver stackkel ellátott moduljaival. Az AMB8626 modul [2] (1.1. ábra) például képes mesh/multi-hop hálózat felépítésére is, a benne lévő mikrokontroller irányítja a kommunikációt, kezeli az adatcsomagok és ellenőrző összegek képzését, a címezést, valamint monitorozza a csatornák elérhetőségét és újraküldi a nem fogadott adatokat. Egy PC-s GUI alkalmazással könnyen konfigurálhatóak a modulok. Mint minden vezeték nélküli kommunikációs modulnál, itt is törekedtek az alacsony fogyasztásra, viszont hátránya, hogy az egységek címezése csak 255 node-ot tesz lehetővé egy hálózaton belül.



1.1. ábra. AMB8626 típusú rádiós modul

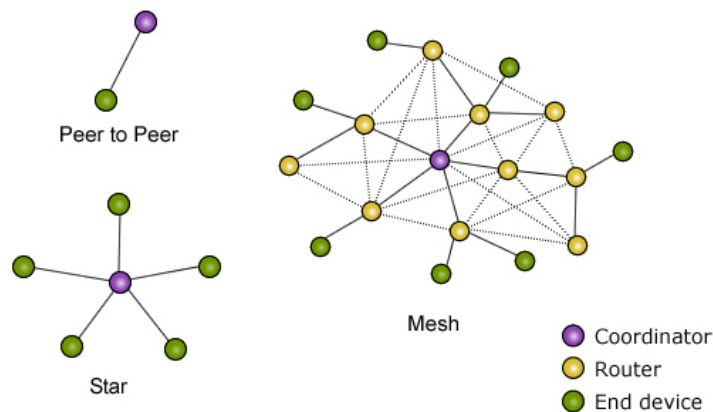
Összességében tehát ezekkel a fejlettebb szoftverrel rendelkező modulokkal már megvalósítható lenne egy mérőórás szenzorhálózat. Egy piackutatási fázis után ki lehetne választani egy modult, amely rendelkezik a szükséges funkciókkal, megfelelő dokumentációval, support szolgáltatással. A beszerezhetőség is fontos tényező, előny, ha van magyarországi beszállítója az adott gyártónak.

## 1.2. ZigBee

Az okos háztartások, lakásautomatizálás területén a vezeték nélküli megoldások körében talán a legnépszerűbb a ZigBee Alliance nevű szervezet szabványa. A weblapjukat [3] megnyitva elég hosszú az ipari partnereket felsoroló listájuk, melyben igazán nagy cégek is sze-

repelnek. A ZigBee fejlesztése során az egyik legfontosabb szempont az alacsony fogyasztás volt. Az alacsony fogyasztási igény határt szab az elérhető hatótávolságnak, ezért a ZigBee eszközök is képesek mesh hálózatot alkotni, ezzel áthidalva nagyobb átviteli távolságokat. Jellemzően alacsony adatátviteli sebességgel működnek, ezzel is növelve az elemről való működés időtartamát. Az adatátviteli sebesség a használt frekvenciasávától függően változik, a ZigBee-s eszközök is az ISM sávokban kommunikálnak (kontinentstől függően az 1 GHz alatti szabad sávokban és a 2.4 GHz körüli frekvenciasávban is).

Egy ZigBee hálózatban három fajta eszköz lehet, amelyet az 1.2. ábra szemléltet. A legfontosabb a koordinátor, egy hálózatban csak egy koordinátor lehet, fa topológiájú hálózat esetén a koordinátor eszköz a gyökérellem. Ez az eszköz építi fel a hálózatot, tárolja az információkat a hálózatról, ismeri a titkosításhoz használt kulcsokat. Ennek az eszköznek állandó tápellátásra és valamivel több memóriára van szüksége, mint a hálózat többi tagjának. Léteznek router eszközök, akik adattovábbítással foglalkoznak a node-ok között. A hálózat többi szereplője úgynevezett End Device, ezek csak a hozzájuk tartozó router-rel vagy a koordinátorral vannak kapcsolatban, a többi end device-szal nem kommunikálnak. Az end device-ok az idő nagy részét alvó állapotban töltik, így biztosítva a hosszú akkumulátor élettartamot. Sokkal kevesebb memóriával rendelkeznek, a protokoll stack mindössze néhány kilobyte memóriát igényel, valamint előállítási költségeik is jóval alacsonyabbak, mint egy koordinátor egységé.



**1.2. ábra.** Lehetséges ZigBee hálózati topológiák

A ZigBee Alliance tagjai elkezdtek használni a ZigBee szabványt olyan céllal, hogy innovatív megoldásokat nyújtsanak a közműszolgáltatóknak, ennek eredményeképp jött létre a ZigBee Smart Energy 1.x szabvány, amelyből már elkészült azóta a 2.0 verzió is. Ebben a projektben a smart metering területen vezető szerepet betöltő cégek mellett a félvezetőgyártással foglalkozó cégek vettek részt. Olyan szabványok kidolgozását tűzték ki célul, amelyekkel egyaránt kielégítik a szolgáltatók és a felhasználók igényeit is. Egy ilyen otthoni monitorozó hálózat segítségével a felhasználók tudatosabban tudják irányítani energiafogyasztási szokásaikat, ezzel energiát és pénzt spórolva. Egyelőre ezek a ZigBee-s hálózattal ellátott okos otthonok leginkább még csak az USA államaiban terjedtek el, de vannak törekvések európai fejlettebb országokban is. Jelenleg azon dolgoznak, hogy házon kívüli

hálózatokra olyan egységes szabványrendszert dolgozzanak ki, amellyel megoldható a különböző okos mérőóra-gyártók termékeinek problémamentes integrálása. Ebből is látszik, hogy ez még egy viszonylag új terület, nincsenek egységes kiforrott szabványok, több szervezet is foglalkozik ezzel a témával. Az majd csak az elkövetkező években, évtizedekben derül ki, hogy hogyan sikerül ezt megoldani, melyik cég megoldása lesz a vezető ezen a területen.

Tehát a ZigBee-képes eszközök hálózatba szervezése jelenleg leginkább csak az egy háztartáson belüli eszközök összekapcsolásában merül ki. Az amerikai felvevőpiacon ez érthető is, hiszen ott a nagyvárosok kivételével a kertvárosi életforma a jellemző, ahol már a házak közti távolság miatt sem működőképes egy ZigBee hálózat. Magyarországon a soklakásos épületekben ez például nem lenne kizáró ok egy ZigBee-s hálózat alkalmazására mérőórák összekapcsolása céljából. Ehhez lehetőségünk van a ZigBee elterjedtségének köszönhetően kész megoldásokból dolgozni. Nagy mérőóra gyártók, mint például az Itron vagy a Landis+Gyr, komplett megoldásokat nyújtanak a mérőórák összekapcsolására. Léteznek olyan mérőórák, amelyekben már eleve be van építve a ZigBee modul, illetve létezik olyan megoldás is, ahol egy általánosabb okos órához lehet ZigBee kommunikációs modult csatlakoztatni. A hálózat koordinátorának szerepét betöltheti a villanyóra mellé telepített modul, vagy pedig egy különálló egység is. Tehát ha minden fogyasztásmérőt ugyanattól a gyártótól vásárolunk meg, akkor valószínűleg tényleg egy működő hálózatot kapunk. Sajnos ez a helyzet ritkán valósul meg, mivel a közműszolgáltató dönti el, hogy milyen gyártmányú mérőórákat használ a rendszerében. Ennek kiküszöbölése történhetne úgy, hogy saját ZigBee modult terveznénk, amelyek a mérőórákkal valamilyen vezetékes kapcsolatban állnak. Ezzel a módszerrel kiküszöbölhető lenne a mérőórák különbözősége, a saját fejlesztésű hardver nyújtana azonos interfészt. Ehhez a hardverhez biztosan szükségünk lenne egy ZigBee modulra vagy SoC-re (System-on-Chip). Mivel sok félvezetőgyártó tagja van a ZigBee szervezetnek, ezért sokféle modul közül választhatunk. Az NXP, a Texas Instruments és a Silicon Labs is széles választékban kínál ZigBee-s megoldásokat, a Silabs inkább SoC-eket és modulokat, a másik két gyártó pedig beépített ZigBee-s mikrokontroller családokat. Ezek használatát az is megkönnyíti, hogy fejlesztőkészletben is kaphatók, így gyorsan kipróbálható a működésük. Ezekhez általában rendelkezésre állnak példaalkalmazások, példakódok, ezzel is gyorsítva a fejlesztést. Az Atmel gyártó ZigBit modulcsaládjá is többféle megoldást kínál, vannak az 1 GHz alatti tartományban, illetve a 2.4 GHz-es tartományban működő moduljaik, illetve ezek közül is választható, hogy integrált chip antennás, vagy UFL csatlakozós verziót szeretnénk.

Összességéppen tehát megoldás lehetne a ZigBee hálózat a mérőórák közti kommunikáció megvalósítására valamilyen saját tervezésű hardverrel.

### 1.3. Z-Wave

A Z-Wave a ZigBee-hez hasonlóan ugyancsak egy mesh hálózat, ami szintén az IEEE 802.15.4 szabvány szerinti protokollon alapszik. A Z-Wave-et is jellemzően helyi hálózatokban használják lakásautomatizálási és biztonsági rendszerekben. A Z-Wave nem használja

a 2.4 GHz-es frekvenciasávot, csak az 1 GHz alatti ISM sávokat, földrésztől függően. A 2.4 GHz mellett szólhat, hogy ez a sáv az egész világon szabad, így a hardverek nem ország-specifikusak, viszont ezt a frekvenciasávot használja a Bluetooth és a Wi-Fi is, ami nem kívánt interferenciákat okozhat. Különbség még, hogy ZigBee chipeket viszonylag sok félvezetőgyártó készít, míg a Z-Wave chip-eket majdnem kizárólag csak a Sigma Designs cég gyártja. Ezzel a megoldással talán kevesebb interoperabilitási probléma léphet fel a különböző eszközök között, amennyiben ez az irányvonal megmarad.

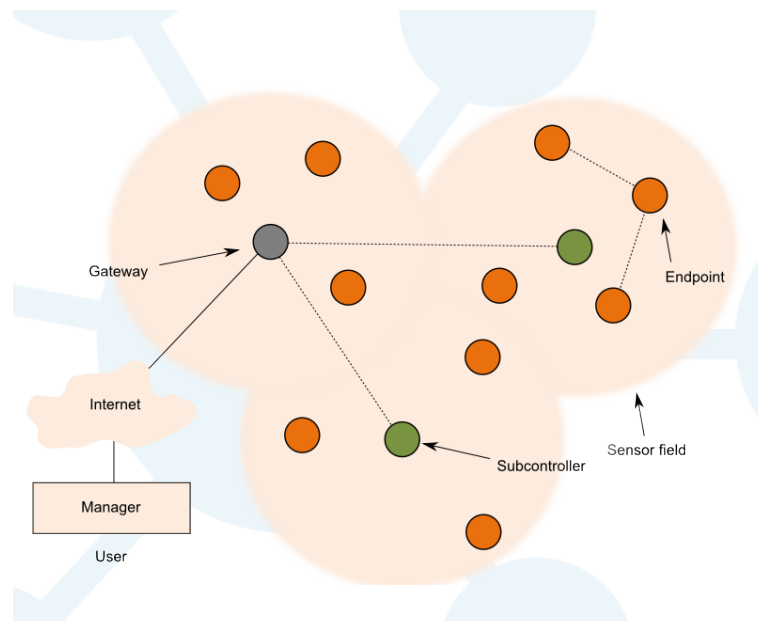
Egy Z-Wave hálózatban alapvetően kétféle eszköz létezhet: controller és slave. A controller irányítja a hálózat többi elemét, a slave-eket. Slave egységből viszont kétfajta létezik: egyszerű és úgynevezett routing slave. Ez utóbbi részlegesen ismeri az útválasztó táblát (routing table), amihez egy sima slave-nek nincs hozzáférése és a teljes táblát csak a controller ismeri. A routing slave-ek a többi node üzeneteit tudják továbbítani a megfelelő helyre, ezzel lehet áthidalni azt a problémát, hogy nem lehet minden slave eszköz a controller hatótávolságán belül. Egy tipikus automatizált lakásban azok az eszközök egyszerű slave-ek, amelyek fix helyre vannak telepítve és hálózati tápellátással rendelkeznek, mint például a fali lámpakapcsolók, dimmerek. Routing slave-ek általában akkumulátorról, telepről üzemelő egységek lehetnek, például egy termosztát. A sima slave-eket akkor érdemes hozzáadni a hálózathoz, amikor már a végleges helyükön vannak. Ha később mégis megváltoztatjuk a helyzetüket, akkor a hozzá tartozó távirányító csak direkt hatótávolságon belül tudja kezelni, mivel a hozzá tartozó bejegyzés az útválasztó táblában helytelen. A Z-Wave hálózat központi eleme lehet egy statikus controller is, például egy PC-n futó szoftver, amely egy USB-s Z-Wave eszközzel van kapcsolatban. Ekkor viszont minden node-ot a statikus controller hatótávolságán belül kell hozzáadni a hálózathoz és csak a hozzáadási fázis után lehet végső helyére rögzíteni.

Egy Z-Wave hálózatban kétféle ID azonosítja a node-okat, az egyik a Home ID, ami az egy hálózathoz tartozó eszközöknél azonos. A controller típusú eszközök gyárilag fel vannak programozva egy Home ID-val, ezt a felhasználó nem tudja megváltoztatni. A slave egységeknek nincs beprogramozott Home ID-juk, a controller egység rendeli hozzájuk a sajátját. A controller tud bevenni új node-okat a hálózatba, úgy, hogy hozzájuk rendeli a Home ID-ját, ha a slave elfogadja ezt, akkor a hálózat részévé válik. A másik azonosító a Node ID, ami pedig az egyes eszközöket azonosítja a hálózaton belül, ezeket a controller osztja ki, ő maga általában az 0x01-es azonosítójú eszköz. Különböző Home ID-val rendelkező egységek nem tudnak egymással kommunikálni, így két hálózat teljesen szét van választva egymástól. A 8 bites Node ID korlátozza az egy hálózatban lévő eszközök számát. Ezt az elméleti határt azonban nem lehet elérni, a tapasztalatok azt mutatják, hogy 30-40 eszközt tud problémamentesen kezelni egy hálózat. Mivel a Z-Wave-et elsősorban lakásautomatizálásra fejlesztették, ez nem okoz gondot, hiszen ez a szám elegendő egy lakás okos eszközeinek kezelésére. Emiatt azonban nem igazán alkalmas az okos mérőórás rendszerek hálózati kommunikációs protokolljának. Ezt az is alátámasztja, hogy a Z-Wave Alliance nem is foglalkozik a smart metering területtel.

## 1.4. DASH7

A DASH7 Alliance Protocol a DASH7 Alliance [4] által fejlesztett aktív RFID alapú vezeték nélküli technológia. Eredetileg katonai logisztikai feladatok elvégzésére fejlesztették, de később kereskedelmi célokra is elkezdtek használni, mint például az épület-automatizálás, különböző beléptető-rendszerek, logisztikai feladatok (konténerek azonosítása, hűtött termékek szállításánál hőmérséklet-monitorozás), parkolóban szabad helyek jelzése, valamint a smart metering területen is. A DASH7 teljesen nyílt forráskódú, a protokoll specifikációja szabadon letölthető a weblapjukról [5], valamint egy OpenTag nevű software stack elérhető githubon [6]. Az OpenTag C nyelven íródott és többféle mikrokontroller architektúrán is futtatható, mivel van jól elválasztott platformfüggetlen része. A DASH7 eredetileg a 433 MHz-es ISM sávot használja, mivel ez minden kontinensen szabad, de már megjelentek a 868/915 MHz-es frekvenciasávokban működő eszközök is a kisebb antennaméret érdekében. Legnagyobb előnyüknek a rendkívül alacsony fogyasztást tekintik, amelyből következően a tápforrásként használt elemek élettartama akár több év is lehet. A kommunikáció hatótávolsága akár a két kilométert is elérheti, ez lehetővé teszi a ritkán lakott területeken való alkalmazását is okos mérőórás rendszerekben. Az adatok biztonsága érdekében a DASH7 is támogatja az AES128 nyilvános kulcsú titkosítást. Az adatátviteli sebesség legfeljebb 167kbit/s lehet, amely elfogadható sebesség kevés adat viszonylag nagy időközönként való átvitelére, amelyet a mérőórák mérési adatainak összegyűjtése is igényel. A szabvány hátránya a feladatom szempontjából, hogy mivel eredetileg RFID szabvány volt, így ebben a formájában nem képes hierarchikus mesh hálózatok létrehozására. A DASH7 hálózat master-slave alapú kommunikációt valósít meg, három fajta node típusa: Gateway (master), Endpoint (slave) és Subcontroller. A subcontrollerekkel lehet kicsit kiterjeszteni a hatótávolságot, így megvalósítható fa topológiájú hálózat, de a gyökérelem alatt legfeljebb két szint lehet, egy a subcontrollereknek, és egy az endpointoknak. Az 1.3. ábrán látható egy lehetséges hálózati elrendezés.

Hardveres szempontból több félvezetőgyártó is kínál termékeket DASH7 alkalmazásához. A Texas Instruments nem konkrétan DASH7 stackkel ellátott megoldást nyújt, hanem a CC430 SoC családot, amely egy alacsony fogyasztású MSP430 mikrokontrollert és egy RF transeivert tartalmaz. A mikrokontroller firmware-ébe kell integrálni az OpenTag software stacket, de nem nagyon lehet találni releváns dokumentumot a TI honlapján. Az ST Microelectronics SPIRIT1 típusú RF adó-vevő integrált áramköre alkalmas megfelelő mikrokontrollerrel kiegészítve DASH7 protokoll szerinti kommunikációra. Interneten talált cikkek szerint az ST Microelectronics az Arira Design-nal közösen kifejlesztett 2009-ben egy fejlesztőkészletet kifejezetten DASH7-hez, de valószínűleg nem végződött sikerrel a projektt, mert egyik cég honlapján sem lehet találni információt erről a development kitről. A Semtech gyártónak viszont létezik egy fejlesztőkártyája [7], amely hivatalosan is támogatja a DASH7-et. Az SX1212-DK7A433 fejlesztőkártya egy Semtech SX1212 rádiós IC-t és egy STM32L151 mikrokontrollert tartalmaz. A kártyán választható, hogy a PCB antennára vagy az UFL csatlakozóra kerüljön a jel. A kártya tápforrása lehet egy CR2450-es gomb-elem vagy az USB csatlakozón keresztül kapott 5 V is. Az Analog Devices ADUCRF101



**1.3. ábra.** *Egy lehetséges DASH7 hálózati elrendezés*

terméke is támogatja az OpenTag-et, ez egy ARM Cortex-M3 processzort és egy RF transceivert tartalmaz és kapható fejlesztőkártyán is.

A multi-hop működésű hálózat támogatásának hiánya miatt alapvetően nem alkalmas a DASH7 a diploma feladatom megvalósítására, illetve a kevés információforrás és hasznos dokumentáció miatt elvettem alkalmazásának lehetőségét. Továbbá ellene szól, hogy az open source kód folyamatosan fejlődik, ha egyáltalán vannak fejlesztők, akik foglalkoznak vele.

### 1.5. Wireless M-Bus

Az M-Bus (Meter-Bus) egy európai kommunikációs szabvány (fizikai-, adatkapcsolati- és alkalmazási rétegre vonatkozóan), amelyet kifejezetten fogyasztásmérő órák hálózatba kapcsolására és mérési adatainak távoli leolvasására fejlesztett ki Professor Dr. Horst Ziegler a németországi paderborn-i egyetemen a Texas Instruments-cel együttműködve. Alapvetően azért kezdtek bele az M-Bus fejlesztésébe, mert úgy gondolták, hogy nincs a piacon olyan kommunikációs protokoll, amely eleget tenne minden olyan igénynek, amely a mérőórák gyors, hatékony és biztonságos leolvasásához szükséges. A következő szempontokat tartották elengedhetetlenek egy ilyen rendszer hatékony működéséhez:

- Nagy számú összekapcsolható eszköz (akár több száz)
- Átvitel akár több kilométer távolságra
- A hálózat könnyű bővíthetősége
- Robusztusság
- Alacsony költség az egész rendszerre nézve
- Alacsony fogyasztás (gyakori a telepről való működés)



- Elfogadható adatátviteli sebesség (egyszerre elég kevés adatot kell továbbítani)

Az M-Bus, mint vezetékes kommunikáció esetében még fontos volt, hogy ne legyen érzékeny a kapacitív- és induktív zavarokra. A Slave egységeket izolálni is kellett a földhurkok elkerülése érdekében. Később megjelent az úgynevezett wireless M-Bus (továbbiakban wM-Bus), amely egy rádiós változata az M-Bus szabványnak, de a felsorolásban szereplő tulajdonságokkal szintén rendelkezik. Napjainkban már amelyik területen lehetséges, ott a vezeték nélküli kommunikációt részesítik előnyben a vezetékes megoldásokhoz képest. A wM-Bus három frekvenciát használ: 868 MHz, 433 MHz és 169 MHz, természetesen ezek is a szabad felhasználású ISM sávokba tartoznak. A wM-Bus tervezésénél is szerették volna elkerülni a gyakran túlterhelt 2.4 GHz-es frekvenciát. A szabványban több működési módot specifikáltak:

- S (Stationary), 868 MHz: A mérőóra egy nap csak néhányszor küld mérési adatot az adatgyűjtő egységnek, így az adatgyűjtőnek is csak ezekben az időszakokban kell aktív állapotban lennie. Van egyirányú és kétirányú alváltozata is. Egyirányú kommunikáció esetén nem működik a kérés alapú kiolvasás.
- T (Frequent Transmit), 868 MHz: Hasonló az S módhoz, csak gyakoribb az adatküldés, szintén létezik egy- és kétirányú változata.
- R (Frequent Receive), 868 MHz: Csak kétirányú verziója létezik, a mérőóra periodikusan kérésre (request) vár az adatgyűjtőtől, ha megkapja, akkor elküldi adatát az kollektornak.
- C (Compact), 868 MHz: Nagyobb adatátviteli sebességű verziója a T módnak.
- F (Frequent Tx and Rx), 433 MHz: Ennek a módnak is csak kétirányú változata létezik. 433 MHz-es frekvencián kommunikálnak a nagyobb hatótávolság érdekében.
- P és Q, 868 MHz: Ezt a két módot később definiálták, hogy a wM-Bus repeaterek működését támogassák. Nem túl elterjedt a használatuk.

Mint az eddig bemutatott protokolloknál, itt is ügyeltek a kis stack méretre (maximum 32 kbyte), hogy egyszerűbb, kis méretű memóriával rendelkező mikrokontrollereken is megvalósítható legyen. A stack mérete függ a használni kívánt wM-Bus módtól is. Szinte minden nagy félvezetőgyártó cég kínálatában elérhetőek wM-Bus kommunikáció megvalósítására alkalmas eszközök. Az ST Microelectronics a DASH7-nél bemutatott megoldáshoz hasonlóan a SPIRIT1 rádiós transeivert ajánlja STM32L152 mikrokontrollerrel és saját wM-Bus protokoll stackkel [8]. USB interfészen keresztül PC-s GUI alkalmazást is biztosít, amellyel megkönnyíti a konfigurációs folyamatot és monitorozási lehetőséget nyújt. Az ST ezen megoldása a következő módokat támogatja: S, T, R és N. A Texas Instruments kétféle megoldást kínál: egy SoC vagy külön mikrokontroller és rádiós IC. Ez utóbbi lehet a CC110x, CC112x vagy CC120x családból származó rádiós IC kiegészítve MSP430 mikrokontrollerrel. A SoC megoldás pedig a már korábban említett CC430 család integrált CC1101 maggal és MSP430 processzorral. A TI ezekhez kínál szoftver megoldásokat is, de

ezek nem implementálják a teljes wM-Bus stacket, csak egyszerűbb funkciók kipróbálására valók. A Silabs is többféle megoldást kínál [9]. A két chipes megoldás a EFM32 MCU család valamely tagját kombinálja az EZRadioPRO (Si446x) rádiós adó-vevővel. A helyspórolás érdekében pedig a rádiós chippel összeintegrált EZR32 Wireless mikrokontrollert fejlesztették ki. Ezekhez a megoldásokhoz a Stackforce GmbH által fejlesztett wM-Bus szoftver stacket ajánlják. Ezek a kombinációk mind működőképeseek lehetnek, de ennél kényelmesebb megoldást nyújt a Telit cég az ME50 wM-Bus moduljaival. Ezek a modulok a Telit saját wM-Bus stackjét használják és nagyon egyszerű AT parancsos kezelési felületet biztosítanak. Firmware-től függ, hogy melyik módot támogatják, ezek alapján a szükséges módhoz tartozó szoftverrel előreprogramozottan lehet vásárolni a modulokat, de lehetőség van később újraprogramozni szükség esetén. Az Amber Wireless is fejlesztett hasonló kivitelű modult AMB8626-M néven.

A felsorolt lehetőségek hardveres szempontból kis mértékben különböznek egymástól, a legoptimálisabb megoldás kiválasztásánál inkább az elérhető szoftvertámogatás játszik fontosabb szerepet, hiszen azon múlik a helyes működés.

## 1.6. Összegzés

### ISM rádió

Az általános ISM sávós rádiós kommunikáció tehát két csoportra bontható: saját protokoll fejlesztése tetszőleges modulhoz, valamint konkrét modul használata a hozzá rendelkezésre álló gyártói protokollal. A saját protokoll stack fejlesztéséről említettem már, hogy viszonylag sok időt vesz igénybe. Gondolok itt arra, hogy specifikálni kell az időzítési paramétereket, az üzenettípusokat, az üzenetek struktúráját. Az üzenetek felépítésénél ki kell találni a nyers adat köré a keretezési módszert, a CRC (Cyclic Redundancy Check) számítási műveletet amiatt, hogy felismerhetőek legyenek a sérült üzenetek. Foglalkozni kell a titkosítás megvalósíthatóságával, szem előtt kell tartani az energiatakarékossági szempontokat. Az összetettség miatt egy ilyen fejlesztési-tesztelési folyamat sok iterációs ciklust tartalmazhat. Egy saját protokoll kifejlesztése annyi munkával jár, hogy a költsége általában nem térül meg, hacsak nem jelent ez valamilyen egyedi okból stratégiai célt az adott cég életében. Esetünkben ezt a megoldást elvetettük a bonyolultsága miatt.

A már létező szoftver stackkel árult modulok használata sem triviális, ha korábban még nem volt használva az eszköz. A gyári szoftver megismerése, kellő mélységben való megértése is sok időt vehet igénybe. Elképzelhető, hogy a rendelkezésre álló dokumentációk nem kielégítőek, esetleg hibásak is. Ha egy ilyen megoldást választanék, akkor tulajdonképpen hozzá lennék kötve ahhoz a konkrét céghez, amelyik az adott modult gyártja. Ez az elköteleződés sem előny, hiszen ha valami történik a gyártóval, akkor elképzelhető, hogy továbbiakban nem lesz beszerezhető a termék. Ezen okok miatt ezt a lehetőséget is elvettem és inkább a szabvány szerint működő megoldások közül választottam. A Z-Wave kivételével a többi protokollhoz több gyártó is kínál megoldásokat.

## Szabvány szerinti kommunikációs protokollok

Az előbbieken bemutatott vezeték nélküli kommunikációs protokollok néhány tulajdonságát az 1.1 táblázatban hasonlítom össze.

Protokoll	ZigBee	Z-Wave	DASH7	wM-Bus
Szabvány	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	ISO/IEC 18000-7	EN 13757-4
Frekvenciasáv	2.4 GHz, 868 MHz	868 MHz	433 MHz (868 MHz)	868/433/169 MHz
Mesh lehetőség	igen	igen	nem	igen
Stack méret	4-32 kbyte	max. 32 kbyte	nincs pontos adat	max. 32 kbyte
Moduláció	BPSK, O-QPSK	FSK	2-GFSK	2-FSK, GFSK
Felhasználási terület	lakásautomatizálás, beltéri	automatizálás	katonai	okos mérőórák

**1.1. táblázat.** *Vezeték nélküli kommunikációs protokollok összehasonlítása*

A ZigBee jó választás lenne, hiszen széles körben elterjedt, népszerű protokoll, sokféle hardver kapható, amely teljesíti a ZigBee szabványban előírtakat. Ami ellene szól, hogy a túlnyomóan használt 2.4 GHz-es frekvencia miatt a hatótávolság lakáson belülre korlátozza az alkalmazhatóságát. Emellett még probléma lehet a 2.4 GHz körüli frekvenciasáv leterheltsége is különböző Bluetooth-os eszközök és a háztartásban található Wi-Fi routerek által.

A Z-Wave hálózat zavaró hátránya, hogy egy hálózatban csak 30-40 eszköz tud biztonságosan működni, és a különböző hálózatok pedig nem tudnak egymással kommunikálni a különböző Home ID miatt. Ez alapján 30 darab mérőóra mellé minimum egy központi egységet kellene telepíteni. Emellett korábban már foglalkoztam más projekt keretein belül Z-Wave-es eszközökkel és nem voltak jó tapasztalataim velük kapcsolatban. A releváns dokumentációk, útmutatók nehezen találhatóak meg és nem elég részletesek. A legnagyobb nehézségek a saját fejlesztésű hardveren található rádiós modul felprogramozásánál adódtak. Nem volt egyértelműen leírva egyik dokumentumban sem, hogy külső memória nélkül nem is képes működni a modul. A saját hardver és egy gyári eszköz párosítási folyamata is nehéz feladat volt. Ezek miatt a Z-Wave használatát is elvetettem.

A DASH7 eredeti funkciója miatt nem támogatja a mesh hálózat-szervezést, ezért nem alkalmas a feladat ellátására. Az interneten nagyon kevés információ érhető el alkalmazásával kapcsolatban és nincs olyan konkrét rádiós modul, amely tartalmazná a használatához szükséges firmware-t. Mindenképpen egy általános rádiós IC, vagy rádiós egységgel egybeintegrált mikrokontroller szoftverébe kellene belefördíteni az open source forráskódot, amelynek állapota és fejlesztési körülményei ismeretlenek. A protokoll portolásával sok probléma lehet, ezért sem találtam alkalmasnak a feladatra a DASH7-et.

Ezen okok miatt indokolt a feladatkiírásban is szereplő wM-Bus protokoll használata a feladat megvalósítására, hiszen annak specifikálásánál kifejezetten arra törekedtek, hogy okos mérőórák összekapcsolására optimalizálják. Kaphatók előre felprogramozott modulok, amelyek működtetése AT parancsok elküldésével irányítható.

## 2. fejezet

# Rendszerterv

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy milyen nagyobb egységekből épül fel a rendszer, ezeknek az egységeknek mi a feladata és milyen kapcsolatban állnak a rendszer többi elemével.

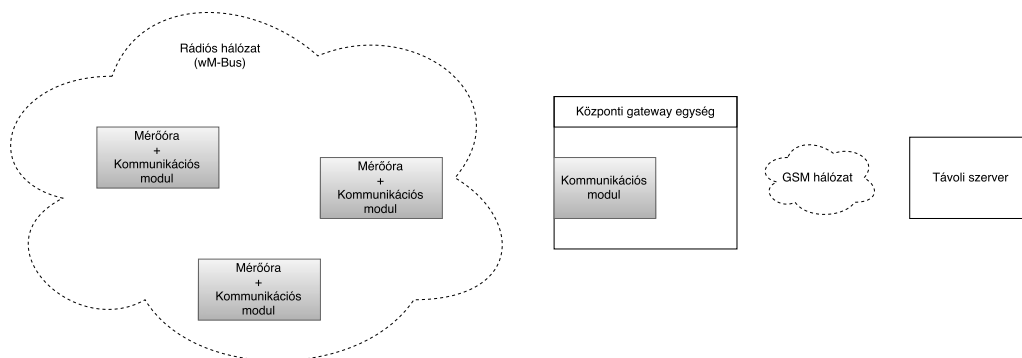
A bevezető részben tárgyaltak alapján a rendszer a hálózatba kapcsolt mérőórákból és egy központi egységből áll. A mérőórák hálózatba szervezését az órák mellé telepített kommunikációs egységek teszik lehetővé. Ezek a kommunikációs modulok képesek a mérőórákból kiolvasni a mérési adatokat, majd azokat a vezeték nélküli hálózaton továbbküldeni a központi egység felé. A legnagyobb, okos mérőórákat gyártó cégek (például Itron, Elster, Landis+Gyr) kínálatát megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy számos különböző kommunikációs interfésszel rendelkező mérőórát árulnak. Talán ezen a területen ez okozza a legnagyobb problémát, hogy nehéz egymással kompatibilis eszközöket találni, főleg ha különböző gyártóktól származó termékekből szeretnénk kiépíteni a rendszert. Ez teljesen reális probléma, hiszen a különböző közmű-szolgáltatók különböző gyártókat fognak beszállítónak választani, saját döntéseik alapján. Ennek a jelenleg is létező problémának a megoldására nyújthat lehetőséget a saját fejlesztésű rendszerünk, amely egy egységes interfészt biztosít az óráknak.

Természetesen nem lehet univerzális megoldást nyújtani erre a helyzetre, de igyekeztem minél több terméket megismerni és azt a következtetést vontam le, hogy a legtöbb mérőóra rendelkezik valamilyen soros kommunikációs interfésszel. Ez már az olcsóbb kategóriájú, de már okosnak számító órákra is igaz. Ezért a mérőóra és a kommunikációs egység közötti kommunikációra az RS232 szabvány szerinti soros kommunikációt választottam. Ezt a döntést az is alátámasztotta, hogy rendelkezésünkre állt egy konkrét mérőóra, amely szintén rendelkezik RS232 interfésszel. Ugyanakkor a dolgozat témája egy kísérleti rendszer megvalósítását tűzte ki céljául, melyben nem feltétlenül szerepelnek minden kommunikációs egység mellett valós mérőórák, sokkal inkább az órák közötti rádiós kommunikáció fejlesztése a cél. A hálózat teszteléséhez maximálisan elegendő a mérési adatokat szimulálni.

A mérőórák közötti rádiós kommunikációra vonatkozóan a feladatkiírás előírta a wM-Bus szabvány szerinti vezeték nélküli kommunikációt, melyet az 1.5. fejezetben már bemutattam és valóban alkalmas a feladat megvalósítására. Tehát összefoglalva a kommunikációs egység RS232 interfészen kommunikál a mérőórával és wM-Bus szabvány szerinti rádiós hálózaton keresztül a többi mérőórával.

A rendszer másik fő eleme egy központi (gateway) egység, amely szintén a wM-Bus hálózat tagja, az adatkoncentrátor szerepét tölti be. Minden óra adatait ehhez az egységhez kell eljuttatni. Az adatkoncentrátortól fizikailag távolabb elhelyezett órák adatai több kommunikációs egységen keresztül jutnak el a központba, mivel a vezeték nélküli kommunikáció hatótávolsága korlátozott. Különösen igaz ez a rendszer fő felhasználási területének szánt soklakásos társasházakban, panelházakban, ahol sok fal akadályozza a jelek terjedését. Elképzelhető elrendezés, hogy egy ilyen tömbházhoz csak egyetlen központi egység tartozik. A központi egység másik fő feladata a wM-Bus hálózaton összegyűjtött mérési adatok továbbítása egy távoli szerver felé. A világon már meglévő okos mérőórás rendszereket tanulmányozva azt a következtetést lehet levonni, hogy erre a kommunikációra legtöbbször a GSM hálózatot használják. Ezzel a kommunikációval a mérési adatoknak el kell jutniuk a szolgáltató egy távoli szerverére, amely általában több kilométeres távolság áthidalását jelenti. Erre kézenfekvő megoldás a cellás mobiltelefon rendszert használni, mivel ez már a legtöbb országban egy jól kiépített, magas lefedettségű százalékkal rendelkező hálózat. A mérőórák felhasználási helye egyébként is a nagyobb városok, ahol 100%-os a GSM hálózati lefedettség. Ezért a mi rendszerünk is a GSM/2G hálózatot használja a szerverrel való kommunikációra.

Az előbbieken bemutatott szempontok alapján az 2.1. ábrán látható a megvalósítandó rendszert bemutató blokkvázlat.



**2.1. ábra.** A magas szintű rendszerterv

## 3. fejezet

# A feladat hardveres egységekre bontása

A 2. fejezetben bemutatott rendszertervet tovább specifikálva, funkciók szerint kisebb részegységekre bontottam a feladatot. A részegységekre bontás közben a hardveres és a szoftveres tervezési szempontokat egyaránt figyelembe vettem. Ennek a tervezési lépésnek az a feladata, hogy a rendszert olyan funkcionális részegységekre bontsa, amelyek fizikailag is külön nyomtatott áramköri kártyákon kerülnek megvalósításra. A rendszerterv alapján jól elkülöníthetők az egyes feladatok, így lehetőség van egy moduláris rendszer létrehozására. Ennek eredményeképp akár olyan általános célú kommunikációs modulok is szülehetnek, amelyek esetleg jövőbeli projekteknél egy-az-egyben vagy kis módosításokkal újrahasznosíthatóak. Ilyen megoldásokkal egy-egy fejlesztés ideje és a fellépő hibák száma is drasztikusan lecsökkenhet.

A következő részegységeket különítettem el:

### 1. Kommunikációs egység

- wM-Bus kártya

### 2. Központi egység

- wM-Bus kártya (ugyanaz, mint a kommunikációs egységben)
- GSM kártya
- Processzoros kártya
- Interfészkártya

## 3.1. A kommunikációs egység

A korábbiakban ismertetett rendszerterv alapján a kommunikációs egység az, amelyet minden egyes mérőóra mellé el kell helyezni. Ennek egyik feladata a mérési adatok kiolvasása az adott órából, másik és egyben legfontosabb funkciója, hogy a vezeték nélküli M-Bus hálózat, mint speciális szenzorhálózat egyik eleme (node-ja). Egy ilyen eszköz nem feltétlenül csak villanyórához lehet csatlakoztatva, ahol általában biztosított a hálózati tápellátás

megléte. Ezért a wM-Bus kommunikációs modullal szemben elvárás, hogy akkumulátorról vagy elemről tudjon működni. Az elemes táplálás akkor hatékony, ha az eszköz a működéséhez szükséges minimális fogyasztással tud üzemelni. Egy ilyen rendszerben a következő okok miatt nem engedhető meg, hogy például havonta lemerüljön az elem. Az elem cseréje ugyan nem igényel különösebb szakértelmet, de ehhez a művelethez mindenképpen ki kell nyitni a készülékházat, amit a felhasználó nem tehet meg. Tehát az elemcseréhez a szolgáltató munkatársainak ki kell menni a helyszínre, holott a távoli leolvasás pont ezt hivatott elkerülni. Belátható, hogy ennek a modulnak a fogyasztása nagyon kritikus paramétere a rendszernek. Szerencsére egy ilyen modulnak az idő nagyon kis hányadában kell ténylegesen aktív módban üzemelnie, hiszen nagyságrendileg fél órás, órás periodicitással kell csak mérési eredményeket szolgáltatnia. Tehát két mérés között az eszköz alvó állapotban lehet, csak olyan részeit kell folyamatos működésben tartani, hogy képes legyen magától felébredni fix időközönként.

Egy komplett okos mérőórás rendszerben sok ilyen kommunikációs egységre van szükség. Egy ilyen egységnek egy kisebb fajta dobozban el kell férnie, amely tartalmazza a funkcionalitást megvalósító nyomtatott áramköri kártyát (továbbiakban wM-Bus kártya) és a tápellátást biztosító elemet.

## **3.2. A központi egység**

A központi egység komplexebb feladatot lát el a rendszerben. Ennek a hardver-együttesnek kell ellátni a wM-Bus hálózat adatkoncentrátorának szerepét, valamint gateway-ként kell üzemelni a wM-Bus hálózatról összegyűjtött adatok számára, hogy azok a GSM hálózat segítségével eljuthassanak a távoli szerver adatbázisába. Ebben az eszközben is kell szerepelnie egy hardveres szempontból teljesen azonos wM-Bus-os kártyának, mint ami a kommunikációs egységben van. Ehhez csak az a funkció szükséges, hogy ne csak az elemről tudjon üzemelni, hanem a központi egység közös tápforrásáról is. A következő bekezdésekben a központi egység többi elemét mutatom be.

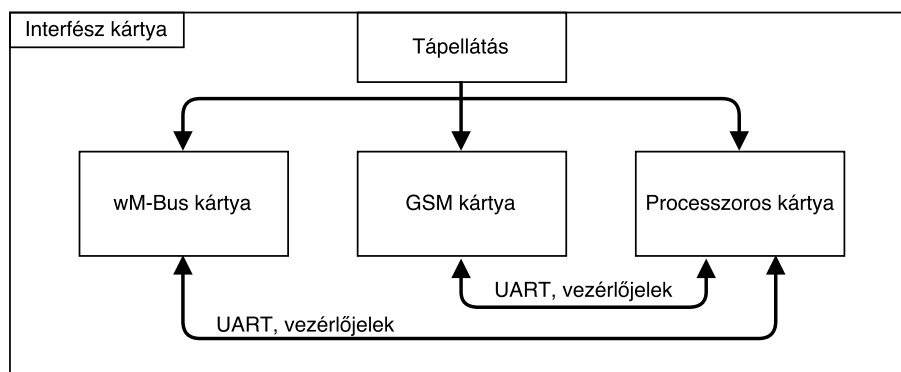
### **3.2.1. GSM kártya**

A központi egységben a GSM kommunikáció megvalósításáért felelős alkatrészeket és áramköri elemeket szintén egy külön NYÁK-ra terveztem elhelyezni, a wM-Bus-os kártyához hasonló kivitelben. A két kommunikációs kártya megközelítően azonos bonyolultságú, ezért körülbelül ugyanakkora NYÁK felületet és egyforma gyártási paramétereket igényelnek. A hasonló kivitel érdekében a tervek szerint a külvilág felé azonos lábkiosztású csatlakozó valósítja meg az interfészt. Ezen a csatlakozón keresztül történik a kártyák tápellátásáért felelős tápfeszültségek átvitele, a kártyák működését befolyásoló reset- és engedélyező jelek átvitele, valamint a kommunikációs interfészek megvalósítása. A GSM kártyánál nem szempont az elemről való táplálhatóság, így a különösen alacsony fogyasztás sem, mivel ezekből csak egy-egy példány szerepel rendszerenként a központi egységben.

### 3.2.2. Processzoros kártya

A központi egységben szükség van egy irányító részegységre, amely menedzseli az adatok mozgását a két kommunikációs hálózat között. Az adatkoncentrátor szerepét betöltő wM-Bus kártyától lekérdezett mérési adatokat el kell juttatni a megfelelő formátumban a GSM kártya számára, hogy az el tudja küldeni a központi szerverre. Ebbe az adatáramlási útba kell beiktatni a processzoros kártyán helyet kapó kontrollert, amely mindkét vezeték nélküli kommunikációt létrehozó modullal kapcsolatban áll.

A processzoros kártya külön NYÁK-on történő megvalósítását leginkább a gyártási szempontok indokolják. A feladatkiírásban szerepel, hogy ennek a processzornak alkalmasnak kell lennie Linux operációs rendszer futtatására. A Linux-ot futtatni képes processzorok már elég komplex applikációs processzorok. Az ilyen processzorcsaládok tagjai általában számos olyan perifériával rendelkeznek, amelyek megkönnyítik az ilyen rendszerekben gyakran előforduló komponensek illesztését, gondolok itt LCD kijelzőkre, különféle külső memóriákra, Ethernet fizikai rétegre. Ezek általában magas lábszámmal járnak együtt, ráadásul a gyors perifériák van, hogy párhuzamos hozzáférésűek. Az ilyen kategóriájú processzorok jellemző lábszáma 200 és 500 között változik az implementált perifériák számától függően. Ez a méret már néhány kivételtől eltekintve megköveteli a BGA (Ball Grid Array) tokozást. A BGA tokozású integrált áramkörök használata a NYÁK-on általában szigorúbb technológiai követelményeket támaszt a gyártási paraméterekre. Ez abból adódik, hogy a nagy tokméret elkerülése érdekében a lábak (ball) viszonylag sűrű mátrix elrendezést mutatnak, emiatt egyrészt több vezetkező réteg kell a NYÁK rétegfelépítésében. Másrészt a lábak közti kevés hely kisebb átmérőjű furatokat és kisebb minimális vezető- és szigetelőszelességet igényel. Ezért ennek a processzort tartalmazó áramkörnek mindenképpen külön NYÁK-ra kell kerülnie, mivel a gyártási technológia miatt maga a PCB (Printed Circuit Board) drágább, mint a rendszer többi komponensének szükséges PCB. Az ár miatt törekedni kell a kis méretre is, csak a legszükségesebb alkatrészeket kell erre a kártyára tervezni.



3.1. ábra. A központi egység blokkvázlata



### 3.2.3. Interfészártya

Az előzőekben bemutatott kártyák közötti kapcsolatok (3.1. ábra) megteremtése érdekében még egy nyomtatott áramkört kell tervezni a rendszerbe, amely a központi egység alapkártyájául szolgál. Ez nem csak a kártyák közötti jelek összekapcsolását tartalmazza, hanem ezen kell előállítani a szükséges tápfeszültségeket is. A központi egység a lakóházon belül minden esetben telepíthető olyan helyre, ahol van lehetőség hálózati feszültségről való üzemeltetésre. Ehhez első lépésként az egyfázisú hálózati váltakozó feszültséget kell az elektronikának megfelelő jelszintű egyenfeszültséggé alakítani. A szükséges további konverziók már ebből a feszültségből végezhetőek. Az egész központi egységet is egy megfelelő méretű készülékházba kell helyezni, amennyiben ez fémből készül, úgy ügyelni kell a megfelelő földelésre, hogy a készülékház biztonságosan érinthető legyen. Ennek a doboznak az oldalára kell kivezetni a wM-Bus és a GSM kártya antennáját is, hiszen egy zárt fémdobozban lesznek ezek a kártyák elhelyezve.

## 4. fejezet

# A wM-Bus kártya tervezése

Ebben a fejezetben a wM-Bus-os kártya tervezési lépéseit mutatom be az alkatrészek kiválasztásától a kapcsolási rajz megtervezésén át a nyomtatott áramkör megtervezéséig.

### 4.1. Kapcsolási rajz tervezése

#### wM-Bus modul

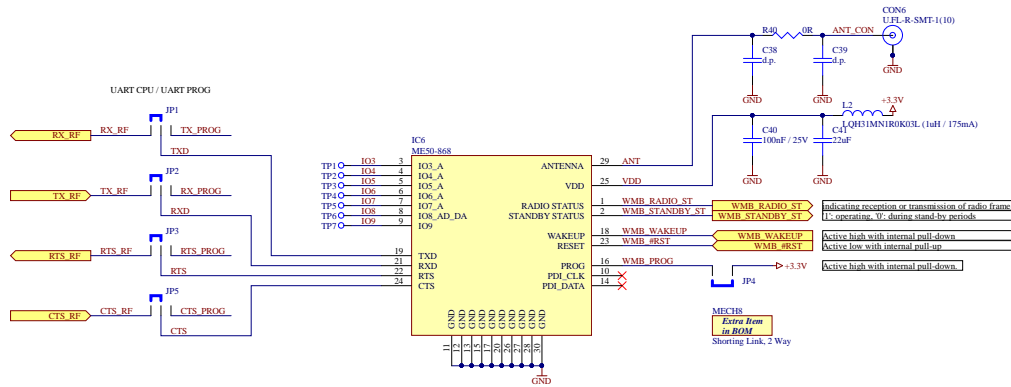
A feladat a wM-Bus kommunikációt megvalósító hardver kiválasztásával kezdődött. Az 1.5. fejezetben már felsoroltam lehetséges hardveres megoldásokat wM-Bus szabványon alapuló vezeték nélküli hálózatok létrehozására. Azok a lehetőségek, amelyeknél egy általános mikrokontroller firmware-ébe kell egy szoftver stack-et integrálni, nagyobb kockázatot hordoznak, mint azok ahol a komplett modult lehet megvenni felprogramozva. Sok esetben a protokoll stack nem is a félvezetőgyártó saját terméke, hanem külső cégek által fejlesztett könyvtárak. Több platformra szánt kódok esetében a legalsó hardver-specifikus réteg akár hiányozhat is, melynek megírása szintén sok időbe telhet. A gyors prototípusfejlesztés érdekében ezért a könnyen kezelhető wM-Bus-os modulok közül válogattunk a szoftvert fejlesztő munkatársammal. Sok gyártó kínál különböző wM-Bus-os modulokat, de végül két modulra szűkült a választási lehetőségek köre. Az egyik a Radiocrafts RC1180-MBUS3 típusú modulja volt, melynek főbb tulajdonságai a következők:

- Több féle wM-Bus módot támogat
- AES-128 titkosítást támogatja
- UART interfész az adatok kiküldésére, fogadott adatok kiolvasására, valamint konfigurációra
- Alacsony fogyasztású módok az elem élettartamának növelése érdekében
- Az antennán kívül semmilyen külső komponenst nem igényel

A másik opció a Telit gyártótól az ME50-868 típusú modul volt. Ez a modul is támogat több féle wM-Bus módot a rátöltött firmware-től függően. A kívánt módnak megfelelő

firmware-rel előre felprogramozottan lehet megvásárolni, de lehetőség van későbbi újra-programozással ezt megváltoztatni. Hasonlóan a Radiocrafts gyártmányú modulhoz, ez is támogatja az AES titkosítást, ugyanúgy UART interfészen keresztül lehet vele kommunikálni AT parancsok segítségével. Szintén van stand-by módja, amelyből tud külső megszakítás hatására ébredni, vagy ciklikusan önmagától. Ez utóbbi esetben egy belső timer-nek futnia kell, emiatt kicsit többet fogyaszt, de így is  $2 \mu\text{A}$  alatt marad a standby fogyasztása. Tehát a két modul nagyvonalakban megegyezik, de a Telit modul mellett szól, hogy a firmware-ben meg van valósítva egy olyan protokoll stack, ami az önszerveződő hálózathoz szükséges. Ez kevés wM-Bus modulra jellemző, mivel a szabvány nem definiál hálózati réteget, csak a fizikai-, adatkapcsolati- és applikációs réteget. Ezen tulajdonsága miatt esett erre a modulra a választás.

A 4.1. ábrán látható a wM-Bus modul és közvetlen környezetének kapcsolási rajza. A modul tápfeszültség lábára a  $+3.3 \text{ V}$ -os feszültség egy zavarleválasztáson keresztül jut el, amelyet a modul User Guide-jában [10] ajánlott LC-szűrővel (L2, C41) valósítok meg.



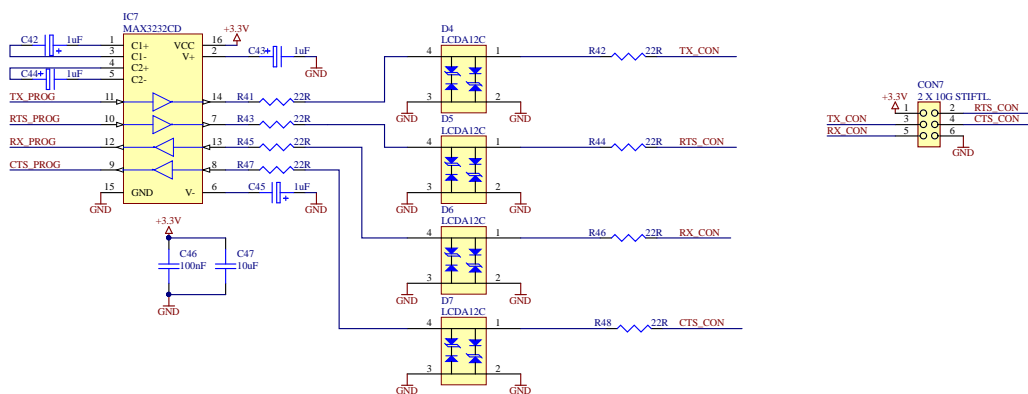
4.1. ábra. A wM-Bus modul és környezete

A modul antenna lábát egy U.FL csatlakozóra kötöttem, egy opcionális pi-szűrőn keresztül. Ennél a vezetéknél figyelni kell a helyes impedancia-illesztésre majd a NYÁK tervezés során. Az U.FL csatlakozó kis helyet foglal el, és kaphatók olyan szerelt átalakító kábelek, amelyek egyik végén U.FL csatlakozó van, a másikon pedig az RF alkalmazásokban megszokott SMA csatlakozó. Ezzel a megoldással lehet a jelet kivezetni a készülékház oldalára, ahova már csatlakoztatható egy SMA csatlakozóval ellátott botantenna. A rádiós modul a 868 MHz-es ISM (Industrial, Scientific, Medical) sávban sugároz, tehát a 868 MHz körüli frekvenciasávra tervezett antennát kell hozzá illeszteni.

A modul soros portja két funkcióra is használható: a modullal való AT parancsos kommunikációra (konfiguráció vagy adat mód), valamint a modulban található mikrokontroller Flash memóriájának újraprogramozására. Ez utóbbi funkció úgy érhető el, ha a modul PROG lábára logikai magas szintet kapcsolunk, amelyet a JP4 jumper felhelyezésével lehet elérni. Ezt a firmware cserét egy PC-s segédprogrammal lehet elvégezni, amihez meg kell valósítani a kapcsolatot a modul soros portja és a számítógép között. Ez úgy a legegyszerűbb, ha a modulon kialakítok egy RS232 fizikai réteget (4.2. ábra) és egy RS232-USB átalakítóval csatlakoztatom a számítógéphez, ahol virtuális soros portként látszik az eszköz.

A 4.1. ábrán látható, hogy a rádiós modul soros portjának jelei kétfelé ágaznak: a wM-Bus kártyán található mikrokontroller vagy az RS232 meghajtó IC (IC7) felé. A kívánt jelutakat jumperek felhelyezésével lehet kiválasztani.

Az RS232 interfész kialakítására a Texas Instruments MAX3232CD típusú integrált áramkört használom, amely két meghajtó és két fogadó csatornát tartalmaz és már 3.3 V-os tápfeszültségről is működik. A TxD és RxD jeleken kívül a RTS (Request to Send) és a CTS (Clear to Send) flow control jeleket is bekötöttem az RS232 IC-be. A meghajtó IC kívülág felőli oldalán már fel kell készülni váratlan túlfeszültségekre, túláramokra is, ezért kerültek a vonalakra a 22  $\Omega$ -os soros ellenállások és az LCDA12C típusú TVS (Transient Voltage Suppression) diódák. Az RS232 jelek nem a szokványos D-SUB csatlakozóra mennek, mivel az túl nagy helyet foglalna el a kártyán, és ezt az interfészt jó eséllyel nem is kell használni soha. Mivel ez egy prototípus eszköz, ezért nem szerettem volna kizárni a modul újraprogramozhatóságának lehetőségét, ez az oka annak, hogy mégis rákerült a kártyára. Továbbá a modul felélesztésekor is hasznosnak bizonyult ez a kommunikációs lehetőség, segítségével gyorsan ki lehetett próbálni, hogy a rádiós modul válaszol-e a neki küldött üzenetekre. Bármilyen terminálprogramból egy tetszőleges AT parancs elküldésével gyorsan tesztelhető, hogy a modul működőképes-e.



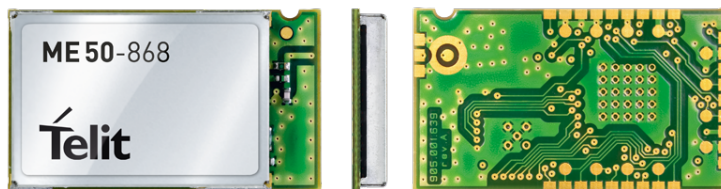
4.2. ábra. RS232 interfész

Található még a modulon néhány vezérlő bemenet, mint például a már említett PROG láb, amivel programozható üzemmódba lehet állítani a chipet. Van egy RESET bemenete, amely aktív alacsony működésű és a modulon belül van a felhúzó ellenállás integrálva a lábhoz, így csökkentve a külsőleg hozzátervezendő alkatrészek számát. Rendelkezik egy WAKEUP bemenettel is, amely pedig magas szintre aktiválódik, ehhez értelemszerűen lehúzó ellenállás van a modulon belül.

Két digitális kimenete is van a modulnak, amelyekről a működési állapot olvasható le. Az egyik a STANDBY STATUS, amely ha magas szintű, akkor a modul normál üzemben működik, a standby periódusok alatt pedig alacsony szinten van. A másik a RADIO STATUS láb, amely azt jelzi, hogy a modul a rádiós csatornán keresztül fogad kereteket, vagy küld.

Van még hét darab szabadon felhasználható GPIO lába, amelyeket ebben az alkalmazásban nem használok, de annak érdekében, hogy mégis hozzáférhetőek legyenek, egy-egy

kis tesztpontra vezettem. A 4.3. ábrán látható, hogy a modulnak nincsenek általános értelemben vett lábai, hanem csak a saját alap PCB-je alján található fém padekre vannak kivezetve a jelek. Ezért ezekhez beforrasztás után már nem lehet hozzáférni.



4.3. ábra. ME50-868 rádiós modul

## Mikrokontroller

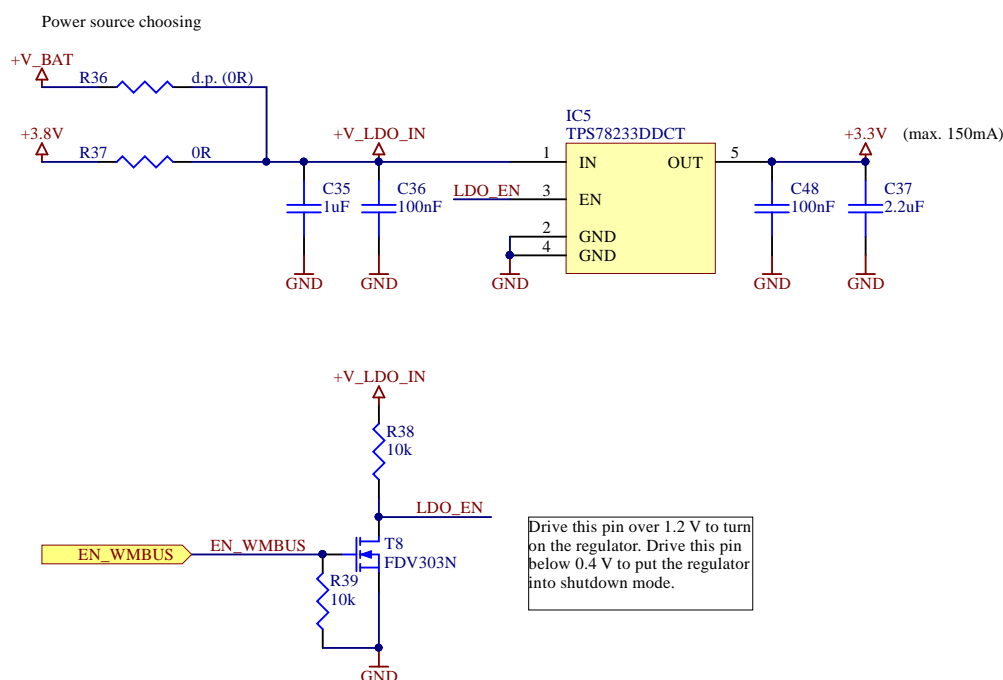
A központi egységben szereplő rádiós modulnak nem feltétlenül lenne szüksége külön mikrokontrollerre, hiszen a processzoros kártya irányíthatná a wM-Bus-os modult egyenesen, de mivel a kommunikációs moduloknak önállóan kell működniük, ezért volt szükség egy lokális mikrokontrollerre a rádiós IC mellé. A telepről történő üzemeltetés miatt fontos szempont az alacsony fogyasztás, emiatt a Texas Instruments MSP430-as low-power mikrokontroller családjából választottam ki a megfelelő típust.

Az MSP430F67xxA családba tartozó kontrollerek úgynevezett Polyphase Metering SoC-ek, alapvetően háromfázisú hálózat fogyasztásának mérésére, adatok feldolgozására és a rádiós kommunikációs modullal való kapcsolat kiépítésére alkalmas perifériákat tartalmaz. Az okos mérőórás rendszerekben elengedhetetlen az adatok titkosítása, amelyet ez a mikrokontroller egy integrált hardveres AES-128 titkosító modullal támogat. A wM-Bus-os modul is tartalmaz ilyen egységet, így bármelyik IC-ben el lehet végezni a titkosítást, csak azt kell megfontolni, hogy megengedhető-e, hogy a rádiós modul és a mikrokontroller közti soros adatvonalakon a titkosítatlan adatok mozogjanak.

Ezek a mikrokontrollerek több általános kommunikációs perifériával vannak ellátva, mint általában az MSP430 család többi tagja. A mi alkalmazásunkban erre szükség is van, mert három különböző célra szeretnénk használni UART-ot: a mérőóra és a mikrokontroller között (RS232), a wM-Bus modul és a mikrokontroller között, valamint a központi egységben található kommunikációs modul esetében a processzoros kártya processzora és az MSP430 mikrokontroller között.

Az MSP430F6779AIPZ konkrét típusra esett a választásom, amely 100 lábú LQFP tokban kapható. A mikrokontroller funkciói és így lábai is, kis mértékben vannak kihasználva, de csak ennek a családnak van megemelt számú kommunikációs portja, melyekből ténylegesen lehet egyidejűleg akár három UART-ot is használni. A 4.4. ábrán látható a mikrokontroller és környezete. A mikrokontroller felprogramozására, debugolására a négy vezetékes szabványos JTAG interfészt lehet használni. Azért is volt előnyben a választáskor a TI MSP430 architektúrája a többi gyártó alacsony-fogyasztású mikrokontrollereivel szemben, mert ehhez a processzorcsaládhoz rendelkezésünkre állt a JTAG-es programozó





4.5. ábra. A kártya tápellátása

fix 3.3 V-os kimenetű feszültségszabályzó, így még külső ellenállásokra sincs szükség a kimeneti feszültség beállításához. Ez az IC maximum 150 mA-es árammal terhelhető, míg a kártya összefogyasztásának maximuma 60 mA körül alakul legrosszabb esetben, amikor a rádiós modul éppen adás közben van. Az IC drop-feszültsége is nagyon kedvező, maximális 150 mA-es terhelésnél, 85°C-os hőmérsékleten is csak 175 mV. Szobahőmérsékleten 50-60 mA-es terhelésnél pedig 50 mV-ra csökken a drop-feszültség. Ezt az LDO-t kifejezetten ajánlják MSP430-as architektúrájú mikrokontrollerek tápfeszültségének előállítására. További kedvező paramétere az 500 nA-es quiescent current, ami azt jelenti, hogy ennyit fogyaszt maga az IC, amikor nincs rajta terhelés, de be van kapcsolva. Van egy EN engedélyező lába, amelyet alacsony szintre húzva az IC kikapcsol, nem állítja elő a kimeneti feszültséget.

## 4.2. Nyomatott áramkör tervezése

### Méret

Nyomatott áramkörök tervezésénél mindig fontos szempont a kártya mérete, hogy mekkora hely áll rendelkezésre a kapcsolás megvalósítására. A kártyák legtöbb esetben valamilyen dobozba kerülnek, melynek dimenziói megszabhatják a kártya maximális méreteit, előírhatnak rögzítéshez szükséges pontokat. Az én esetemben nem voltak ilyen jellegű előírások, a doboz kiválasztása nem a tervezés előtt történt. Természetesen törekedni kell a minél kisebb méretű NYÁK tervezésére, mert a nyomatott áramkör árát jelentősen befolyásolja a fizikai mérete is.

## Rétegfelépítés

Nagyobb alkatrészsűrűséget úgy lehet elérni, ha a huzalozási rétegek számát megnöveljük. Ekkor a vastag táp- és földvezetékek átkerülhetnek egy-egy belső rétegre, ezzel felszabadítva a helyet a felső és alsó oldalon. A wM-Bus kártyán a rádiós modul is indokolja a 4 rétegű NYÁK használatát, hiszen az antenna megfelelő hullámimpedanciával történő huzalozásához ajánlott egy összefüggő földréteget kialakítani alatta. Ezek alapján az egyik belső réteg egy teljesen kiöntött föld réteg, a másikon pedig a különböző tápfeszültségek és szükség esetén egyéb jelvezetékek futhatnak. Az alkatrészek elhelyezése alapvetően mindkét külső rétegen történhet, csak arra kell figyelni, hogy a magasabb alkatrészek a felső oldalra kerüljenek. Erre azért van szükség, mert ez a kártya board-to-board csatlakozóval fog csatlakozni az interfészkártyára és a csatlakozópár összmagassága határozza meg, hogy milyen magas alkatrészek férnek el a két kártya között.

## Alkatrészek elhelyezése

Ilyen esetben, amikor nincs meghatározva előre a kártya alakja és mérete, viszonylag nagy a szabadság az alkatrészek elhelyezését illetően. A wM-Bus modul antennáját ajánlott távol tartani potenciális zajforrásoktól. Általában ilyen zavarforrás lehet, ha kapcsolóüzemű tápegység állítja elő a tápfeszültséget, de jelen esetben nincs ilyen komponens a kártyán. Az egész rádiós modult ajánlott az alkatrészsoldalon körbevenni egy nagy földkiöntéssel, melyet sok vián keresztül kell a belső földréteghez hozzákötni. További elhelyezési irányelv lehet, hogy a csatlakozók lehetőleg a kártya szélein helyezkedjenek el. A fix tápfeszültséget előállító IC-t és a hozzá tartozó passzív elemeket javasolt az elem csatlakozójához közel helyezni és ott helyben elvégezni a feszültségstabilizálást. A NYÁK egyik dimenzióját meghatározta az interfészkártya felé kapcsolatot biztosító csatlakozó, mely a kártya alsó oldalán kapott helyet. Emellé elhelyeztem még két darab M3-as csavarral való rögzítésre alkalmas furatot. Ezután elhelyeztem tetszőlegesen a nagyobb alkatrészeket, mint például a csatlakozók, a wM-Bus modul és a mikrokontroller. Egy jó alkatrész-elrendezés nagyon meg tudja könnyíteni a huzalozási fázist, ezért érdemes jól átgondolni előre, hogy melyik jelek merre fognak haladni. Minden integrált áramkörnél fontos irányelv, hogy a hidegítő kondenzátorokat a lehető legközelebb kell helyezni az IC táplálásához, különösen kell erre a szabályra figyelni a mikrokontrollernél. A mikrokontrollernél továbbá fontos, hogy az órajelet szolgáltató kristály is közel legyen az IC-hez, és a kristályhoz menő két vezeték lehetőleg közel azonos hosszúságú legyen.

## wM-Bus modul

A wM-Bus modul huzalozásánál fontos feladat volt az antennavezeték 50  $\Omega$ -os hullámimpedanciájának biztosítása. A sík hullámvezető (Coplanar Waveguide) hullámimpedanciájának kiszámítására sok online kalkulátor és letölthető program is rendelkezésre áll. Ezt a számítást az Avago Technologies AppCAD nevű programjával végeztem. Először ki kellett választani, hogy van-e földkiöntés a hullámvezető alatt. Az impedancia az alábbi paramétereiktől függ:



- A vezető és az alatta lévő földkiöntés közötti szigetelőréteg vastagságától
- A vezető és az alatta lévő földkiöntés közötti szigetelőréteg dielektromos állandójától
- A vezető vastagságától
- A vezető szélességétől
- A vezető és a mellette futó földvezeték távolságától

A hullámimpedancia nem függ a vezető hosszától és csak nagyon kis mértékben függ a vezetett jel frekvenciájától. A 4.6. ábrán látható a kalkulátor program felülete, amelyen a számításhoz használt paraméterek értékei is láthatók. Néhány paraméter a NYÁK rétegfelépítéséből és a gyártáshoz használt anyagok jellemzőiből adódik. Ezért fontos feladat még a NYÁK tervezés első fázisában a leendő gyártó kiválasztása. A szükséges paraméterek értékeiről a NYÁK gyártó cég tud információkat szolgáltatni. Ilyen paraméter a szigetelőréteg vastagsága és dielektromos állandója. A vezető vastagsága ugyan választható paraméter, de a standard értékektől való elérése nagy árnövekedést okoz. Ezért nem érdemes különleges vastagságú rézfóliával ellátott NYÁK-ot választani, hacsak valamilyen igény ezt kifejezetten nem indokolja. Ilyen igény lehet például nagy áramok átvezetése a NYÁK-on, amely vastagabb rézréteget igényel. Az antenna esetében nem érdemes eltérni a standard rézvastagságtól, hiszen a többi paraméterrel is beállítható a kívánt impedancia. A vezető vastagsága egyébként sem egy egzakt szám, az induló rézvastagság a gyártás végére a technológia miatt megnövekszik. Az ábrán a számok mil mértékegységben vannak megadva.

**Coplanar Waveguide**  With Groundplane  No Groundplane

Calculate Z0 [F4]

Z0 = **49.5**  $\Omega$

Elect Length =   $\lambda$

Elect Length =  degrees

Elect Length =  mil (Air Line equiv.)

Delay =  ps

1.0 Wavelength =  mil

Vp =  fraction of c

$\epsilon_{eff}$  =

Shape factor =

Diagram parameters: L=1000, H=14.17, T=0.70, W=22.5, G=10.63,  $\epsilon_r = 4.8$

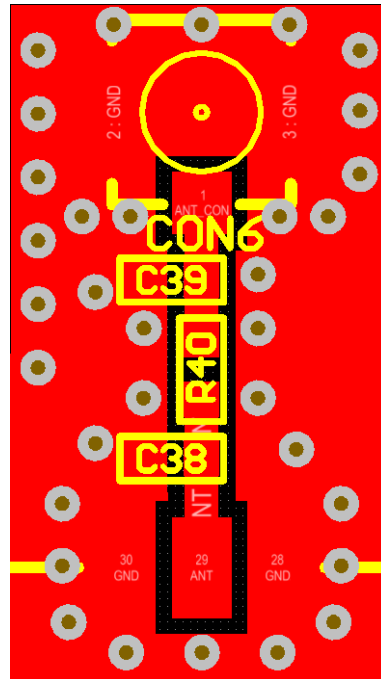
Frequency:  GHz

Length Units:

4.6. ábra. Hullámimpedancia kalkuláció antennavezeték tervezéséhez

A rézréteg vastagsága a külső oldalon (T paraméter) 0.7 mil, amely  $18 \mu\text{m}$ -nek felel meg. A dielektromos állandó és a H paraméter adott, így a W és G paraméterek változtatásával tudjuk elérni a kívánt hullámimpedanciát. A W paraméter értékét az antennavonalon

található opcionális pi-szűrő passzív alkatrészeinek pad mérete határozta meg. Csak így valósítható meg, hogy az antennavonal teljes hosszán azonos vastagságú vezetéken terjedjen a jel. Ezek után már csak a G paraméter volt szabadon állítható, ezzel történt az impedancia beállítása, amely ezekkel az értékekkel  $49.5 \Omega$ -ra adódott. Ez elég közel van a szükséges  $50 \Omega$ -hoz. Ezek után a NYÁK tervező programban lehetőség van olyan szabályok létrehozására, melyek automatikusan betartják ezeket a kiszámított értékeket (vezeték szélessége és a vezeték földkiöntéstől vett távolsága). A 4.7. ábrán látható az antennavezeték megvalósítása a nyomtatott áramkörön körülötte a kiöntött föld réteggel.



4.7. ábra. Antennavezeték kialakítása a NYÁK-on

## 5. fejezet

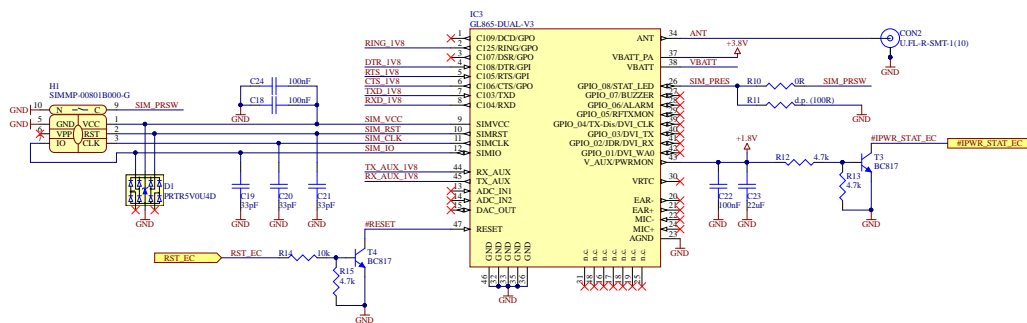
# A GSM kártya tervezése

A következő bekezdésekben a GSM kártya tervezési folyamatát mutatom be.

### 5.1. Kapcsolási rajz tervezése

A GSM kártyából egy példány van egy rendszerben aközponti egységben, így a GSM modul mellé nincs szükség külön mikrokontrollerre, ezt közvetlenül a processzor kártyára csatlakoztatom. A korábban már említettek alapján ennek a kártyának az a feladata, hogy a wM-Bus hálózat adatkoncentrátorától a processzoros kártyán keresztül megkapott adatokat elküldje egy távoli szerverre, ami a végső felhasználás szempontjából az adott közműszolgáltató szervere. A GSM kommunikáció megvalósítására a szintén Telit gyártmányú GL865-DUAL-V3 típusú GSM modulra esett a választás, mivel a Telit-es wM-Bus modullal könnyű volt dolgozni. Ez a GSM modul is AT parancsokkal vezérelhető soros porton keresztül.

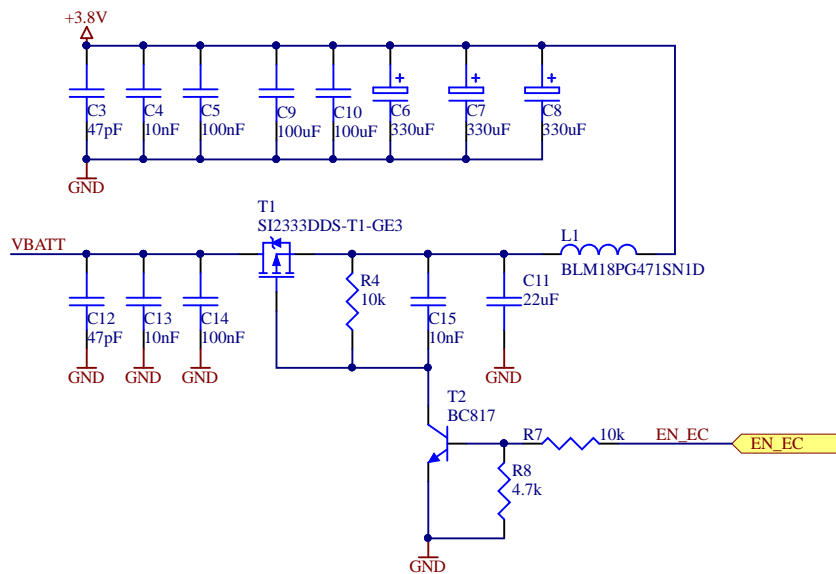
Az 5.1. ábrán látható a GSM modul és környezetének kapcsolási rajza. A modul +3.8 V-os tápfeszültséget igényel, amely az interfészkártyán lesz előállítva, ezt a feszültséget kapja meg a wM-Bus-os kártya is.



5.1. ábra. A GSM modul és környezete

A modulnak két tápfeszültség bemenete van, mindkettőre ezt a 3.8 V-ot kell kapcsolni. A VBATT nevű lábra kapcsolt feszültség a modulban található mikrokontrollert táplálja, a VBATT\_PA lábra kapcsolt pedig a Power Amplifier-t. A modulnak kétféle kikapcsolási lehetősége van: General turn OFF és Processor turn OFF. General turn OFF eseményt úgy

lehet előidézni, hogy mindkét táplábról egyidejűleg elvesszük a feszültséget. Ekkor a modul ténylegesen kikapcsol, nem fogyaszt semmit. A Processor turn OFF esetén csak a VBATT lábról kell elvenni a feszültséget, így a modulban található mikrokontroller kapcsolható ki, ezzel  $30 \mu\text{A}$  körüli értékre lehet csökkenteni a fogyasztást. Ennek megvalósítása érdekében külön kapcsolhatóvá kellett tenni a VBATT-ra jutó tápfeszültséget, melyet az 5.2. ábra szemléltet. Az EN\_EC engedélyező lábra logikai magas szintet adva a T2 tranzisztor kinyit, így a kollektora közel GND-re kerül, amely a T1 p-csatornás MOSFET gate-je is egyben. Mivel a T1 FET source-a 3.8 V-on van, ezért ekkor ez a tranzisztor is kinyit és a VBATT-tal jelölt vezetéken is megjelenik a 3.8 V. Ezzel a két tranzisztoros kapcsolással oldható meg, hogy ponált logikájú legyen az engedélyező jel. Az 5.2. ábrán továbbá még látható a 3.8 V-os tápfeszültségen viszonylag sok kondenzátor. A kisebb értékűek (C3, C4, C5) különböző frekvenciájú zavarokat hivatottak szűrni, a többi nagy értékű kerámia és tantál kondenzátor pedig pufferként funkcionál, mivel a GSM modulokra rövid ideig tartó viszonylag nagy áramfelvételek (1-2 A) jellemzőek. Ilyenkor a modul a kondenzátorokban tárolt energiát használja fel és nem okoz a tápfeszültségen nagyobb beszakadást.



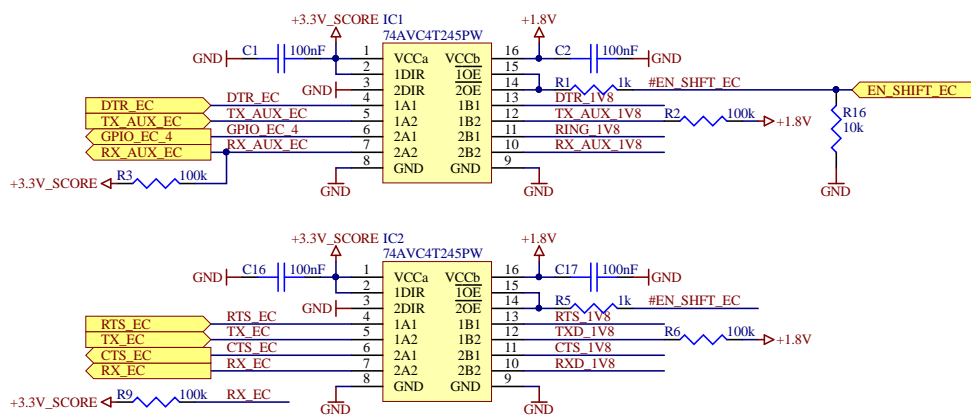
5.2. ábra. A GSM modul tápfeszültségei

A modul 3.8 V-os tápfeszültsége mellett 1.8 V-os szintű jelekkel dolgozik az alacsonyabb fogyasztás érdekében. Ezt az 1.8 V-os feszültséget a V\_AUX/PWRMON feszültség monitorozó lábára ki is adja, melynek meglétét a #IPWR\_STAT\_EC vonalon lévő alacsony szint jelzi. Ezt a jelet ki is viszem a csatlakozóra, hogy a processzoros kártya értesüljön róla.

Szintén a processzortól a csatlakozón keresztül érkező RST\_EC jel magas szintre kapcsolásával a modul resetelhető. A modulnak használjuk még a SIM kártya interfészét, melyhez egy 8-pólusú mini SIM socket-et (H1) csatlakoztattam. A SIM kártya interfész táp, reset és adat IO vonalára egy-egy ESD (Electrostatic Discharge) védő diódát terveztem, me-

lyek egy tokban vannak. Ezekre azért van szükség, hogy megvédjem a GSM modult az elektrosztatikus kisülésekkor keletkező túlfeszültségektől, amelyek a SIM kártya csatlakozó érintésekor keletkezhetnek. Az integrált áramkörökben általában vannak beépítve védődiódák, viszont ezek nagyon kis méretük miatt nem képesek nagyobb energiák elnyelésére, ezért szokás külső védelmet is alkalmazni. Ebben a SIM kártya tartóban vagy egy olyan kontaktus felület, ami összezáródik, ha SIM kártya van a csatlakozóban, ezzel lehet detektálni a SIM kártya jelenlétét. A SIM\_PRSW jel GND-re kerül, ha van csatlakoztatva SIM kártya, melyet a GSM modul egy szabad GPIO-ja érzékel.

Mivel a GSM modul jelei 1.8 V-os jelszintűek, a feldolgozó processzor pedig 3.3 V-os jelekkel dolgozik, ezért szükség van szintillesztésre (5.3. ábra) a két IC között. Ezt a szintillesztést ezen a kártyán célszerű megvalósítani, mert ezen a kártyán rendelkezésre áll az 1.8 V-os feszültség, amit a GSM modul a V\_AUX lábán ad ki, így ezt lehet használni a szintillesztő IC egyik oldali tápfeszültségének. Összesen nyolc jel illesztésére van szükség, amelynek fele a GSM modulnak bemeneti, a másik fele kimeneti jele. Erre a célra a 74AVC4T245PW szintillesztő integrált áramkört választottam, amely összesen négy vonalat tud átalakítani, mindkét irányba. Kettesével beállítható a jelek iránya és külön engedélyezhető a két-két kimenet. Az IC mindkét oldali tápfeszültsége 0.8 V-tól 3.6 V-ig terjedhet. Az IC2 szintillesztőn az UART adatjelei mennek keresztül az RTS és CTS hardveres flow-control jelekkel. Itt vigyázni kellett a TX és RX jelek helyes bekötésére, mivel az IC nem a saját szemszögéből nézve van elnevezve, tehát a TX lába bemenet, az RX lába pedig kimenet. A másik szintillesztőn a másik, külső UART jelei és a RING bejövő hívást jelző jel megy keresztül. A DIR lábakra magas szintet kapcsolva a jel az A oldal felől a B felé halad, alacsony szintet kapcsolva pedig fordítva.



5.3. ábra. Szintillesztés

A modul antennája a wM-Bus modulnál bemutatott módon van megoldva itt is, csak a botantennából a GSM frekvenciára tervezett verziót kell csatlakoztatni.

## 5.2. Nyomtatott áramkör tervezése

A nyomtatott áramkör tervezésénél a wM-Bus kártyánál már bemutatott szempontok voltak mérvadóak. Ez a két kártya hasonló bonyolultságú áramkört valósít meg, mindkettőn helyet foglal egy rádiós modul, csak a GSM esetében nem kell lokális mikrokontroller, viszont szükség van egy SIM kártya tartóra, ami körülbelül ugyanakkora helyet igényel. Ezért a kártya méretét a wM-Bus kártya mérete határozta meg, a körvonalat és a rögzítő csavarok helyét átmásolva kezdtem el a tervezését. A GSM modul miatt itt is indokolt volt a négy rétegű NYÁK használata, ezért ugyanazt a rétegfelépítést használtam, mint a wM-Bus kártya esetében.

Az alkatrészek elhelyezése közben itt is arra kellett figyelni, hogy az antenna közelében lehetőleg ne legyen semmi, illetve a SIM kártya tartó olyan orientációval legyen elhelyezve, hogy a SIM kártya bedugását és kihúzását ne akadályozza semmi. Mivel volt hely a GSM modul mellett ezért standard méretű SIM kártya tartót választottam, így befér a normál méretű kártya is és adapterrel a micro és nano SIM is. A SIM interfész vonalain lévő ESD védődiódákat a csatlakozóhoz közel kell elhelyezni, hogy az esetleges túlfeszültség-tűskéket a lehető legrövidebb úton levágják és azok ne terjedjenek tovább a kártyán. Ezért a védődiódákat a csatlakozó alá helyeztem el a NYÁK másik oldalára.

Ezen a NYÁK-on is fontos feladat volt az antennánál az  $50\ \Omega$ -os impedancia-illesztés. Mivel ugyanolyan rétegfelépítésű alapanyagra terveztem az áramkört, ezért alkalmazhatom volna a wM-Bus modul antennájánál kiszámolt értékeket. Ezekről egy kis mértékben eltértem, mert itt nem korlátozta a vezeték vastagságát a passzív elemek footprintjének mérete. A számítás az 5.4. ábrán látható, 24 mil széles vezetékkel és 15.5 mil vezetőtávolsággal a hullámimpedancia pontosan  $50\ \Omega$ -ra adódik.

**Coplanar Waveguide**  With Groundplane  No Groundplane

Calculate Z0 [F4]

$Z_0 = 50.0\ \Omega$

Elect Length = 0.154  $\lambda$

Elect Length = 55.6 degrees

Elect Length = 1821.310 mil (Air Line equiv.)

Delay = 154.311 ps

1.0 Wavelength = 6480.420 mil

$V_p = 0.549$  fraction of c

$\epsilon_{eff} = 3.32$

Shape factor = 0.436

Dielectric:  $\epsilon_r = 4.8$

Frequency: 1 GHz

Length Units: mils

Diagram labels: L=1000, T=0.7, H=14.17, W=24, G=15.5

5.4. ábra. Hullámimpedancia kalkuláció antennavezték tervezéséhez

## 6. fejezet

# A processzoros kártya tervezése

Ebben a fejezetben a központi egység működéséért felelős processzoros kártya tervezési lépéseit mutatom be. A diplomaterv elkészítése során ennek a kártyának a megtervezése volt a legkomplexebb feladat. A tervezés alapvetően ugyanolyan fázisokból állt, mint a többi kártya esetében, azonban ez a kártya bonyolultabb gyártási technológiát igényelt.

### 6.1. Processzorválasztás

A processzoros kártya tervezése a processzor kiválasztásával kezdődött, hiszen ez az áramkör legfontosabb eleme és ez határozza meg a többi alkatrész kiválasztását is. A megfelelő processzor kiválasztásához meg kellett ismernem a piacon jelenlévő termékeket. A processzorral szembeni elvárások a következők:

- Beágyazott Linux operációs rendszer futtatására képes
- Külső memóriák illesztéséhez szükséges interfészek: SD kártya/NAND flash; DDR2 DRAM
- Titkosítás támogatása
- 2-3 UART periféria
- Előny, ha van hozzá fejlesztőkártya (referencia kapcsolási rajz, Linux)
- Előny, ha jó a gyártói támogatás (használható dokumentumok, jó szoftverek)
- Gyárthatóság (például a BGA pitch ne legyen kisebb 0.8 mm-nél)

A processzor kiválasztása a lehetséges processzormagok keresésével, megismerésével kezdődött. Olyan egyszerűbb magok jöhettek szóba, amelyek már alkalmasak operációs rendszerek futtatására. Az ARM9 egy nagyon sikeres, megbízható architektúrája az ARM-nak, rengeteg licenzt adtak el belőle. Szinte minden nagyobb gyártónak (ST Microelectronics, NXP (Freescale Semiconductor), Texas Instruments) van ARM9-es magra épülő processzor-családja. Az ARM9-en belül az ARM926EJ-S mag van felkészítve OS alapú alkalmazásokra,

ebben van már olyan MMU (Memory Management Unit), amely ezt lehetővé teszi. Ugyanakkor ez már egy régebbi architektúra, azóta megjelentek az ARM Cortex magok. Ezek közül is a Cortex-A magok az alkalmazás-processzorok, az ARM a Cortex-A5 magot ajánlja az ARM926EJ-S mag kiváltására. Az A5 a legegyszerűbb A mag, de mégsem jellemző a gyártók kínálatában. Az NXP-nek van egy családja, amelyben Cortex-A5 és Cortex-M4 magot integrálnak egy processzorba inkább autóiipari alkalmazásokra. A Cortex magok előnye az alacsonyabb fogyasztás a hasonló kategóriájú classic magokhoz képest, de ez ebben az alkalmazásban nem szempont, mivel hálózatról üzemel a központi egység. A Cortex magok másik fő előnye, hogy könnyebb a portolás a különböző processzorok között az új architektúrának köszönhetően. Ez sem elsődleges szempont, mivel nem áll rendelkezésre a cégnél olyan korábbi projekt, amiből át lehetne emelni részleteket. A klasszikus magok viszont olcsóbbak a Cortex magoknál. A választás tehát az ARM926EJ-S magra esett, mivel nincs olyan elterjedt Cortex-A mag, ami komplexitásában hasonló lenne hozzá.

A következő lépésként kerestem különböző gyártók kínálatában olyan processzorokat, amelyek többnyire megfelelnek a felsorolt feltételeknek. Az 6.1 táblázatban összehasonlítok három processzort, amelyek alkalmasak lehetnek a feladat elvégzésére. Látható, hogy nagyjából hasonló paraméterekkel rendelkeznek minden szempontból. Az Atmel gyártmányú processzor lenne a legideálisabb, mert minden feltételnek eleget tesz, viszonylag kevés lába van, tehát nincs sok felesleges kihasználatlan perifériája. Sajnos ezt a processzor már úgy tűnik, hogy nem gyártják, van amelyik beszállítónál elérhető még pár darab, de csak a készlet erejéig, van ahol már egyáltalán nincs. Ilyen meghatározó alkatrészek esetén elvárás, hogy legalább két beszállítótól be lehessen szerezni. A Texas Instruments-es processzor nem támogat semmilyen titkosítást, és lábszámban sem optimális. Ezen okok miatt az NXP processzorra esett a választásom. Fontos tényező a tokozás típusa, mivel jórészt ettől függ az egész PCB-re vonatkozó gyártási technológia. A 0.8 mm-es ball-távolság a legkisebb, amit még viszonylag standard paraméterekkel le lehet gyárttatni. Ha ennél közelebb vannak egymáshoz a lábak, akkor egyrészt sokkal vékonyabb vezető- és szigetelőtávolságot kell alkalmazni, illetve megnövelheti a szükséges rétegszámot is. További hátrány kis láb-távolság esetén, hogy már nem lehet standard viákat elhelyezni a lábak között, mert nem lehet már olyan kis furatot gyártani. Ekkor közvetlenül a lábak alá szokás úgynevezett Via in Pad microviákat tervezni, de ezeket a viákat fel kell tölteni fémmel, hogy forrasztáskor ne szívja be az ónt a furatba. Ez nagyon drága technológia, csak olyan alkalmazásokban éri meg használni, ahol nagyon kritikus paraméter a méret, például mobiltelefonok esetén.

Típus	AT91SAM9CN12	MCIMX283DVM4B	AM1802
Processzormag	ARM926EJ-S	ARM926EJ-S	ARM926EJ-S
Gyártó	Atmel	NXP	Texas Instruments
Titkosítás	AES, TRNG	AES	-
SD kártya, külső FLASH interfész	SD kártya, MLC/SLC NAND	SD kártya, MLC/SLC NAND	SD kártya, MLC/SLC NAND
Külső RAM interfész	SDR, LPDDR, DDR2	DDR2, LV-DDR2, mDDR	DDR2, mDDR
UART	2	4	3
Tokozás	217 BGA (0.8 mm)	289 BGA (0.8 mm)	361 BGA (0.8 mm)
Fejlesztőkártya	nincs	van	van
Beszerezhetőség	nem elérhető	elérhető	elérhető

**6.1. táblázat.** *Processzortípusok összehasonlítása*



Tehát az NXP i.MX28 processzorcsaládjából választottam ki az MCIMX283DVM4B típusú processzort, ami ennek a négy tagú processzorcsaládnak a második legegyszerűbb tagja. Az i.MX286 és az i.MX287 már tartalmaz olyan perifériákat, amelyekre egyáltalán nincs szükségem, viszont feleslegesen drágítják a processzort. A kiválasztott processzor adatlapjában [11] az ajánlott alkalmazási területek között szerepel az okos fogyasztásmérőórák és gateway-ek. A processzor néhány jellemzője, amelyek a feladat szempontjából fontosak:

- 16-bites mobile DDR (mDDR) (1.8 V), DDR2 (1.8 V) és LV-DDR2 (1.5 V) illesztésére alkalmas EMI interfész
- Négy SSP (Synchronous Serial Port) periféria SD/MMC kártya illesztéséhez vagy SPI kommunikáció céljára
- Két USB2.0 periféria (egyik lehet OTG)
- Négy AUART (application Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) periféria
- Power Management Unit (PMU) 3-kimenetű DC-DC kapcsolóüzemű konverterrel, illetve több lineáris regulátorral, Li-ion akkumulátor töltési lehetőséggel

## 6.2. Kapcsolási rajz tervezése

A kapcsolási rajz tervezéséhez rendelkezésemre állt a gyártó weboldaláról regisztráció után letölthető referencia kapcsolási rajz [12] és a fejlesztőkártya kapcsolási rajza is. Ezen két dokumentum nagy százalékban megegyezik, csak a referencia kapcsolás több opciót is mutat egy-egy periféria használatára.

### 6.2.1. Külső RAM kiválasztása, bekötése

A processzor kiválasztása után következett a külső RAM (Random Access Memory) memória kiválasztása. Erre azért volt szükség, hogy tudjon operációs rendszert futtatni a processzor. A processzor chipjén 128 kbyte méretű SRAM memória van integrálva, ez azonban az adatlap szerint is csak nagyon kis erőforrásigényű operációs rendszer futtatásához lehet elég. Nagyon kis erőforrásigényű OS-t valamilyen célalkalmazásra lehet használni, amely csak az ahhoz legszükségesebb funkciókat tartalmazza, minden más eltávolításra kerül a kernelből. Egy általános méretű, teljesen funkcionális beágyazott Linux futtatásához néhány megabyte RAM-ra van szükség, ezért mindenképpen ajánlott külső RAM-ot illeszteni a processzorhoz.

A processzornak van egy EMI (External Memory Interface) perifériája, amely többféle külső DRAM (Dynamic RAM) illesztését támogatja:

- 1.8 V Mobile DDR1 (LP-DDR1)
- Standard 1.8 V DDR2
- Low Voltage 1.5 V DDR2 (LV-DDR2)

Ezek közül én a sztenderd 1.8 V-os DDR2 memóriát választottam. A processzor 16 bites szervezésű memóriákat támogat, ezekből létezik a piacon 256, 512 Mbites, valamint 1 és 2 Gbites verzió. A processzor a 2 Gbiteset már nem támogatja. Mivel a szoftverfejlesztés és a hardverfejlesztés nagyjából párhuzamosan haladt, ezért ebben a fázisban még nem tudtuk pontosan, hogy milyen bonyolultságú algoritmusok fognak futni a processzoron. Az 1 Gbites (128 Mbyte) DDR2 memóriát választottam, mivel a kisebb méretű memóriák nem jelentősen olcsóbbak, csak néhány száz forint az árbeli különbség. Prototípus eszköznél ez az összeg nem számít, ha később sorozatgyártásra kerülne a sor és a kész rendszernek tudnánk a pontos memóriaigényét, akkor költségoptimalizálási szempontból le lehetne cserélni a memóriát kisebbre. Ez könnyen megtehető, hiszen ezeket a memóriákat footprint szinten kompatibilisre tervezik egymással, csak ekkor lesznek nem használt címvezetékek.

A konkrét típus kiválasztásához megnéztem, hogy mi érhető el a gyakori beszállítóink kínálatában és az Alliance Memomry AS4C64M16D2-25BCN típusú DDR2 SDRAM-jára (Synchronous DRAM) esett a választásom. Ez az integrált áramkör egy 84 lábú FBGA (Fine-pitch Ball Grid Array) tokban van elhelyezve, amelynek ball távolsága 0.8 mm, a processzoréhoz hasonlóan. Ez azért előnyös, mert így lehet ugyanolyan vezetőszélességgel huzalozni a processzor és a memória közti vonalakat, illetve ugyanakkora furatok férnek el mindkét IC padjei között.

A DDR2 memória bekötéséhez és későbbi huzalozásához a tervezési irányelveket, betartandó szabályokat az NXP az AN2910 [13] dokumentumában foglalta össze. A 6.1. ábrán látható a processzor EMI perifériája. A DDR2 memória interfész jeleit az alábbi csoportokba lehet besorolni:

#### 1. Adatvezetékek és a hozzájuk tartozó strobe és mask jelek

- D00-D15: 16 bites adatbusz
- DQS0\_P/N: differenciális adat strobe jelpár a D00-D07 adatvonalakhoz
- DQS1\_P/N: differenciális adat strobe jelpár a D08-D15 adatvonalakhoz
- DQM0, DQM1: írási ciklus közben az adat byte-onként maszkolható, DQM0 a D00-D07 byte-hoz, DQM1 a D08-D15 byte-hoz tartozik

#### 2. Cím- és parancsvezetékek

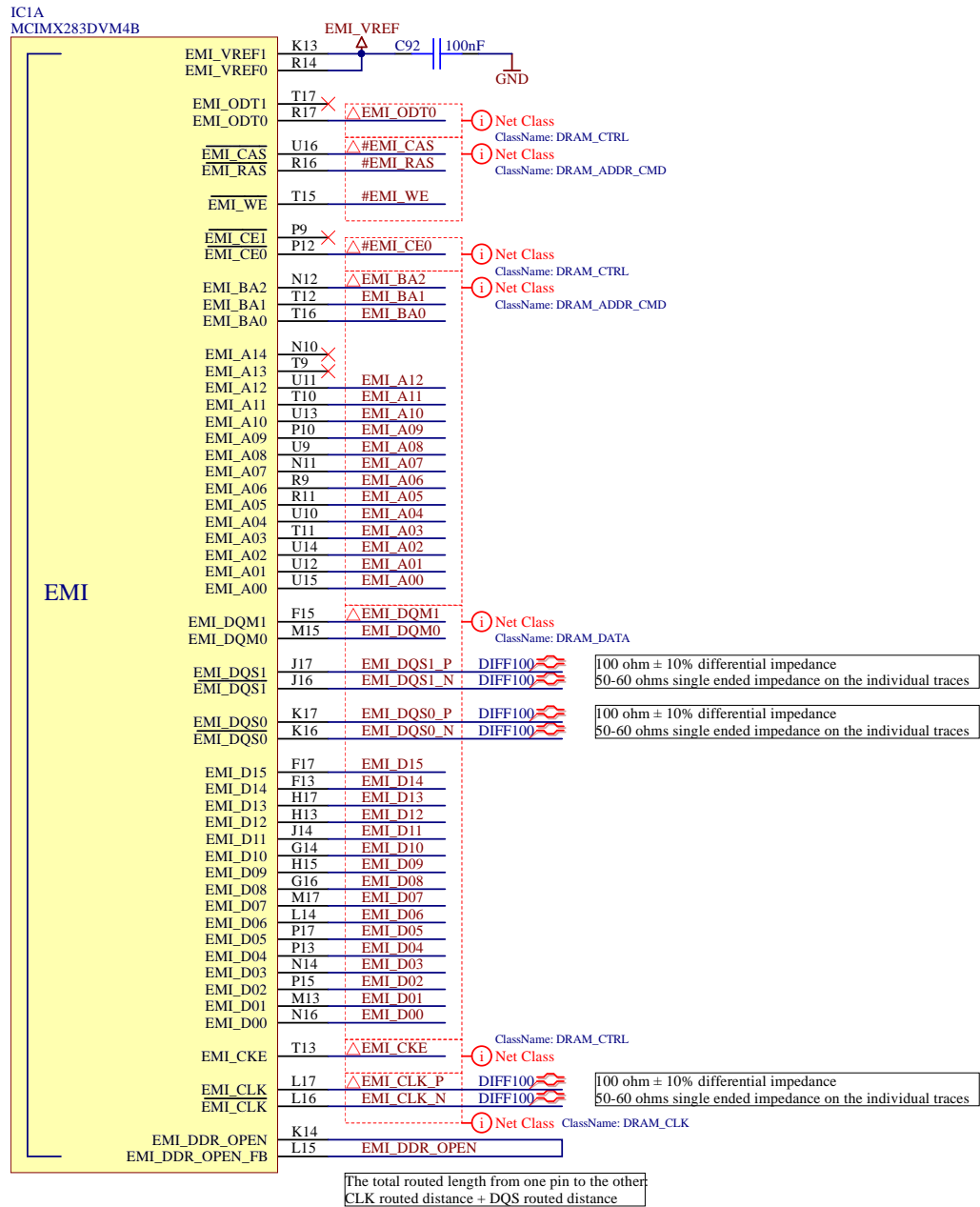
- A00-A12: 13 bites címbusz
- BA0-BA2: ezekkel a jelekkel választható ki, hogy melyik memóriabankhoz akarunk hozzáférni
- #CAS, #RAS, #WE: ezekkel a jelekkel választható ki, hogy milyen műveletet szeretnénk végrehajtani (írás, olvasás, bankaktiválás, precharge, stb.)

#### 3. Vezérlőjelek

- ODT0 (On Die Termination): a memóriában található belső lezáró ellenállások kapcsolhatók be ezzel a jellel
- #CE0: Chip Select jel, ezzel engedélyezhető a parancs dekódolás
- CKE: Clock Enable jel, ezzel aktiválható a CLK órajel

#### 4. Órajel

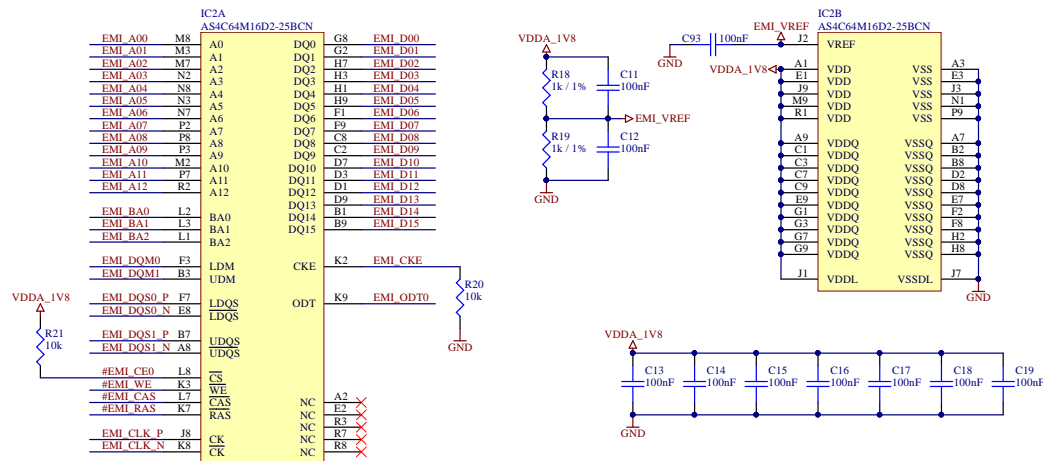
- CLK\_P/N: differenciális órajel-pár, a jelek mintavételezése a CLK jelek élváltásaira történik



6.1. ábra. A processzor EMI perifériája

A 6.1. ábrán látható, hogy ezek a jelsoportok úgynevezett Net Class-okba vannak foglalva, ez később a NYÁK tervezéséhez lesz szükséges. Ezzel lehet a vezetékeket osztályokba rendezni, amelyekre különböző szabályokat lehet létrehozni, valamint a vezetékek hosszainak egymáshoz illesztését is megkönnyíti. Továbbá a differenciális párok is be vannak jelölve már a kapcsolási rajzon. Csak úgy lehet két vezeték differenciális párnak defi-

niálni, ha ugyanaz a nevük és az egyik jel a P, a másik pedig az N utótagot kapja. A processzor EMI perifériáján három differenciális jelpár található: a CLK órajel és a két adat strobe jel, melyeket 100  $\Omega$ -os differenciális ellenállással kell majd huzalozni. Továbbá a külső memória interfészhez tartozó jeleket külön-külön 50-60  $\Omega$ -os impedanciájúra kell tervezni a megfelelő működés érdekében. Ezekre a tervezési szempontokra majd a NYÁK tervezést bemutató fejezetben visszatérek. A processzornak van egy EMI\_DDR\_OPEN és egy EMI\_DDR\_OPEN\_FB lába, melyeket egy vezetékkel össze kell kötni majd a NYÁK-on és a vezeték hosszának meg kell egyeznie a CLK órajel hosszának és a DQS strobe jel hosszának összegével.



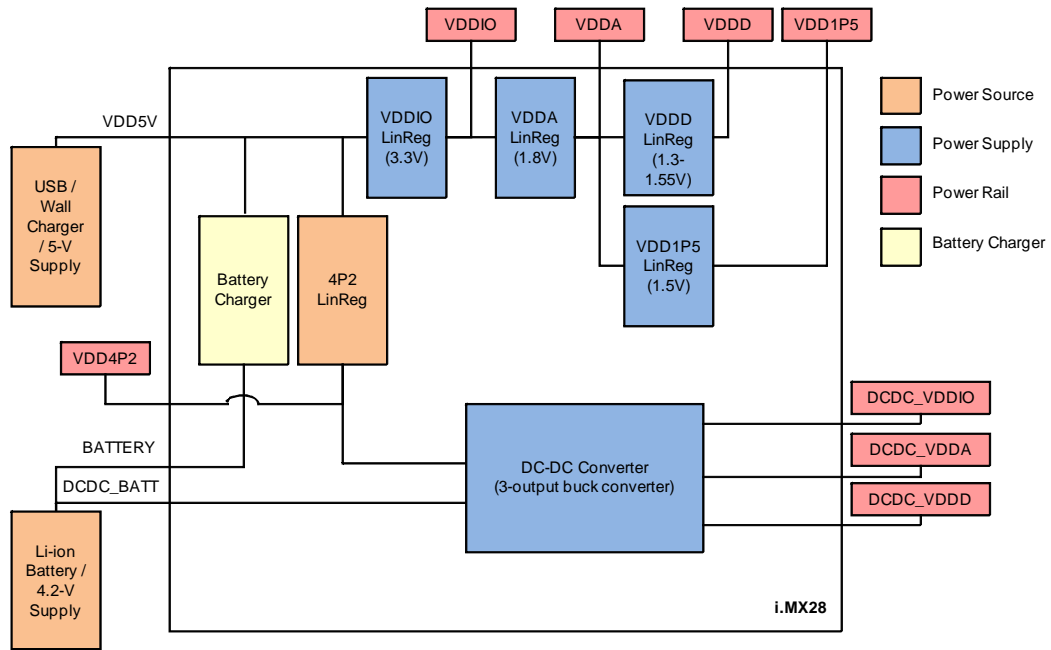
6.2. ábra. DDR2 memória bekötése

A 6.2. ábrán a memória bekötésének kapcsolási rajza látható. A processzor perifériáján bemutatott jelek mind megtalálhatóak a memórián is, ezeket a párokat értelemszerűen össze kellett kötni egymással. A DQS és DQM jeleknél kellett figyelni az eltérő elnevezések miatt, hogy a processzornál 0-s indexű jelek a memóriánál L (Lower), az 1-es indexűek pedig U (Upper) előtagot kaptak. A memória 1.8 V-os tápfeszültségről működik és szüksége van egy referencia-feszültségre a VREF lábán, amely a tápfeszültség felével egyezik meg, és a differenciális jeleket fogadó áramköröknek van rá szüksége. Ezt a referencia-feszültséget a tápfeszültségből egy ellenállásosztón keresztül állítottam elő, amely két egyforma értékű, 1%-os tűrésű ellenállásból (R18, R19) áll. Ezt a feszültséget megkapja a processzor is és a tervezési útmutató alapján a VREF előállítási pontjánál, valamint a processzor és a memória VREF pinje mellett is szerepel egy-egy 100 nF-os hidegítő kondenzátor. Említettem már, hogy az ODT pin állapotától függ, hogy engedélyezve vannak-e a lezáró ellenállások, azonban ez csak akkor jut érvényre, ha a memória Extended Mode Register-ében nincs letiltva az ODT. Amennyiben engedélyezve van, akkor 50  $\Omega$ , 75  $\Omega$  és 150  $\Omega$  közül lehet választani a regiszter ide tartozó bitjeinek beállításával. Az IC táplálbái mellé szánt 100 nF-os kondenzátorokból annyi került a kapcsolási rajzra, amennyi később elért a NYÁK-on, de igyekeztem a lehető legtöbbet elhelyezni.

## 6.2.2. Tápfeszültségek előállítása

A processzoros kártya a fő tápfeszültséget az interfész-kártyáról kapja, amely lehet 5 V vagy 3.8 V. Ebből kell előállítani minden szükséges feszültséget a processzor és a memória számára. A kiválasztott processzorban található egy elég komplex PMU (Power Management Unit), amely minden feszültséget előállít, amire szüksége van a működéshez. Ez a megoldás azért is előnyös, mert így nem foglalnak helyet a NYÁK-on különböző táp IC-k, habár léteznek olyan integrált áramkörök, amelyekben több tápegység is megtalálható. Ezek jellemzően tartalmaznak egy kapcsolóüzemű tápegységet az első konvertálási lépcsőhöz, ahol nagyobb feszültségkülönbség van a bemenet és a kimenet között, valamint egy-két darab kisebb terhelhetőségű lineáris regulátort. A gyártó weblapjáról letölthető egy dokumentum [14], amely bemutatja a processzorban található PMU-t és annak lehetséges használati módjait. A 6.3. ábrán látható a PMU blokkvázlata, amely tartalmaz egy három-kimenetű feszültségcsökkentő DC/DC konvertert és négy darab lineáris regulátort. A bemeneti feszültség függvényében három fajta üzemmódban tud működni ez a tápegység rendszer, melyekhez szoftvertámogatás is elérhető, hogy könnyen tudjuk konfigurálni az alkalmazásunkhoz legjobban illeszkedő struktúrát. Egyik lehetőség, hogy a bemeneti feszültség egy fix 5 V-os tápfeszültség, amely származhat USB perifériáról, hálózati adatterről vagy bármely más módon előállított fix 5 V-os forrásból. A második opció a manapság népszerű Li-ion akkumulátorról való táplálás, amelyből egy cellának a maximális feszültségértéke 4.2 V körül van. Azonban nem csak akkumulátoros táplálás esetén választható ez a bemenet, bármilyen fix feszültségforrás köthető a DCDC\_BATT lábra, amely 3.3 V és 4.2 V közötti feszültséget állít elő. Ez teszi lehetővé, hogy a processzor akár 3.3 V-os feszültségről is képes üzemelni. Ez a bemenet az én esetemben alkalmas a 3.8 V-os feszültség használatára, amelyet a GSM modulnak kell biztosítani a rendszerben. Egy harmadik lehetőség a PMU használatára, amikor alapvetően akkumulátorról jár a rendszer és kihasználjuk a PMU akkumulátor-töltő funkcióját. Ekkor az 5 V-os bemenetre kötött feszültségből állítja elő a töltéshez szükséges feszültséget a processzor.

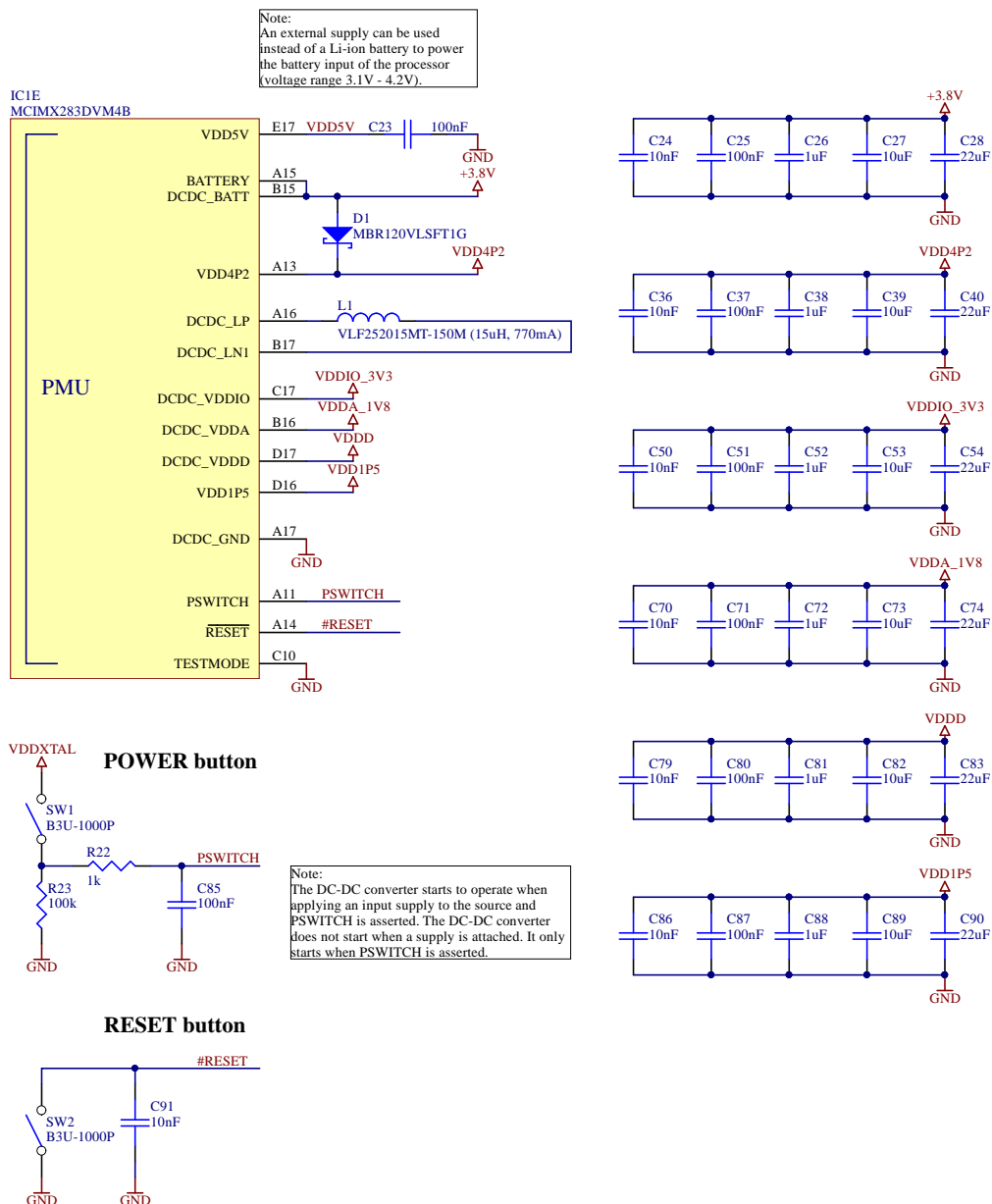
Az én alkalmazásom szempontjából ez utóbbi működési módra nem volt szükség, hiszen akkumulátor nem szerepel a rendszerben, viszont az első két opció bármelyike megfelelő. A következő fejezetben bemutatott interfész-kártyán előállításra kerül 5 V és 3.8 V is, ezért meg kellett vizsgálnom, hogy melyik bemeneti opció milyen előnyökkel és hátrányokkal jár. Amennyiben a VDD5V lábon keresztül tápláljuk a processzort, akkor bekapcsoláskor egy 100 mA-es bemeneti áramkorlát van, meg kell győződni róla, hogy elegendő-e ez a rendszerünknek a bootolás alatt. Ez azért van, mert ebben az esetben a 4P2 jelölésű lineáris regulátor állítja elő a DC/DC átalakítónak a bemeneti feszültséget. Ezzel szemben, ha a DCDC\_BATT pinről tápláljuk a processzort, akkor azt közvetlenül megkapja a DC/DC átalakító, ekkor nincs ez a 100 mA-es áram limit. A másik működésbeli különbség a bekapcsolási folyamathoz kötődik. 5 V-os táplálás esetén a tápfeszültség megjelenésekor a belső lineáris átalakítók automatikusan elindítják a processzort, a bootolási folyamat után a firmware engedélyezi a 4.2 V-os lineáris regulátort, amely előállítja a DC/DC konverter bemeneti feszültségét, és az átveszi a lineáris regulátorok szerepét. Amennyiben csak a



6.3. ábra. A processzor PMU-jának blokkvázlata

DCDC\_BATT lábön jelenik meg a 3.3 V és 4.2 V közötti feszültség, és az 5 V-os bemenetet nem tápláljuk, akkor a DC/DC átalakító nem indul el automatikusan, a bekapcsoláshoz a PSWITCH lábön létre kell hozni egy adott hosszúságú impulzust. Ez biztosítja, hogy ha akkumulátorról üzemel a rendszer, akkor a feszültség jelenléte önmagában nem elég a bekapcsoláshoz, így nem fogyaszt feleslegesen a rendszer, amikor nincs rá szükség. Végül a 3.8 V-os feszültséget választottam a PMU bemeneti feszültségének, a használati útmutató is ezt részesíti előnyben, mivel ez közvetlenül táplálja a DC/DC konvertert, melynek hatásfoka is nagyobb a lineáris szabályzóknál.

Az előbbieken tárgyaltak alapján a 6.4. ábrán szerepel a processzor PMU-jának használata. Látható, hogy a DCDC\_BATT lábára van kötve a 3.8 V-os tápfeszültség, illetve a BATTERY láb is megkapja ezt a feszültséget, mivel ezen a lábön érzékeli a tápegység a bemeneti feszültséget. A VDD5V lábára az útmutató ajánlása alapján került egy 100 nF-os hidegítő kondenzátor (C23). A PMU-ban található három-kimenetű DC/DC tápegységnek csak egy külső inductívásra (L1) van szüksége, amelyhez a méretezési szempontok a referenciakapcsolásban vannak megadva. Az inductívitás értékének  $4.7 \mu\text{H}$  és  $15 \mu\text{H}$  között kell lennie, illetve törekedni kell az alacsony soros ellenállásra. További fontos szempont volt a kis méret, ami főleg a tekercsen átfolyó maximális áram értékét korlátozza. A kis méret nem kizárólag a helytakarékoság célját szolgálja, hanem ekkor lehet a lehető legrövidebb vezetékkel bekötni az inductívitást a processzorba, ezzel minimalizálva a kialakuló áramhurok méretét. A kisebb területet átfogó áramhurok mindig kisebb kibocsátott elektromágneses sugárzást eredményez, így kisebb mértékben zavarja a környezetében lévő egyéb áramkörök működését. A TDK gyártó VLF252015MT-150M típusú  $15 \mu\text{H}$ -s inductívitását választottam a feladatra, amelynek tipikus soros ellenállása  $370 \text{ m}\Omega$ . Körülbelül 370 mA-es terhelésnél elkezdi csökkenni az inductívitás értéke, de ez elegendő számomra a működés-



6.4. ábra. A processzor PMU-jának használata

hez. A processzor 3.3 V-ról valamivel több, mint 100 mA-t fogyaszt, ehhez adódik hozzá a microSD kártya fogyasztása, amely jellemzően 30 mA körül mozog, de legfeljebb 80 mA lehet. A DDR2 memória fogyasztása nagy mértékben függ az aktuális működési módtól, de a legtöbb erőforrást igénylő műveletek közben (mint például burst-ös írás/olvasás) legfeljebb 235 mA. Az induktivitás legkedvezőbb paramétere a rendkívül kis mérete: 2.5 mm x 2.0 mm x 1.5 mm. A DC/DC konverter bemenetére, a 4.2 V-os sínre és a DC/DC konverter mindegyik kimenetére 5-5 darab különböző értékű kerámia kondenzátort helyeztem el, amelyek közül a kisebb értékűek zavarcsűrési feladatot, a nagyobb értékűek puffereelési feladatot látnak el.

Amint már említettem a processzor bekapcsolásához szükség van a PSWITCH lábon lét-

rehozott legalább 100 ms hosszú impulzusra. Ennek egyik lehetséges megvalósítási módja, hogy egy nyomógommbal a VDDXTAL kimenetet kapcsoljuk a PSWITCH lábra. A VDDXTAL lábon a tápfeszültség megléte mellett mindig jelen van feszültség, ezért használható a DC/DC konverter bekapcsolására. Az 1 k $\Omega$ -os soros ellenállásnak (R22) áramkorlátozó szerepe van. A kapcsolásban található még egy reset gomb (SW2) is, melynek megnyomásakor resetelődik a processzor és kikapcsol a DC/DC konverter is, ha a VDD5V lábra nincs tápfeszültség kapcsolva. A referenciakapcsolás a korábban bemutatott mindhárom tápellátási módhoz ajánl reset áramkört.

### 6.2.3. Külső Flash választása, bekötése

A processzorban nincs olyan nem felejtő memória, ami alkalmas lenne a programkód tárolására és többször újraírható. Ezért mindenképpen kell hozzá illeszteni egy külső Flash memóriát, amely lehet NAND Flash az áramköri lapra ültetett integrált áramkörrel megvalósítva vagy valamilyen kívülről csatlakoztatható memóriakártya. A processzor SSP (Synchronous Serial Port) perifériáira lehet illeszteni MMC (MultiMediaCard), SD (Secure Digital) vagy SDIO memóriakártyát. Az SSP0 és az SSP1 periféria 1-, 4- és 8-bites módot is támogat, az SSP2 és az SSP3 csak 1- és 4-biteset. Az SSP1 és az SSP3 periféria a kiválasztott processzorban nincs megvalósítva, csak a processzorcsalád bonyolultabb tagjaiban. Az MMC memóriakártyák manapság már nem annyira elterjedtek, szinte mindenhol felváltották használatukat a különböző SD kártyák. Külső Flash memóriának tehát egy microSD kártyát választottam a lehető legkisebb helyfoglalás érdekében.

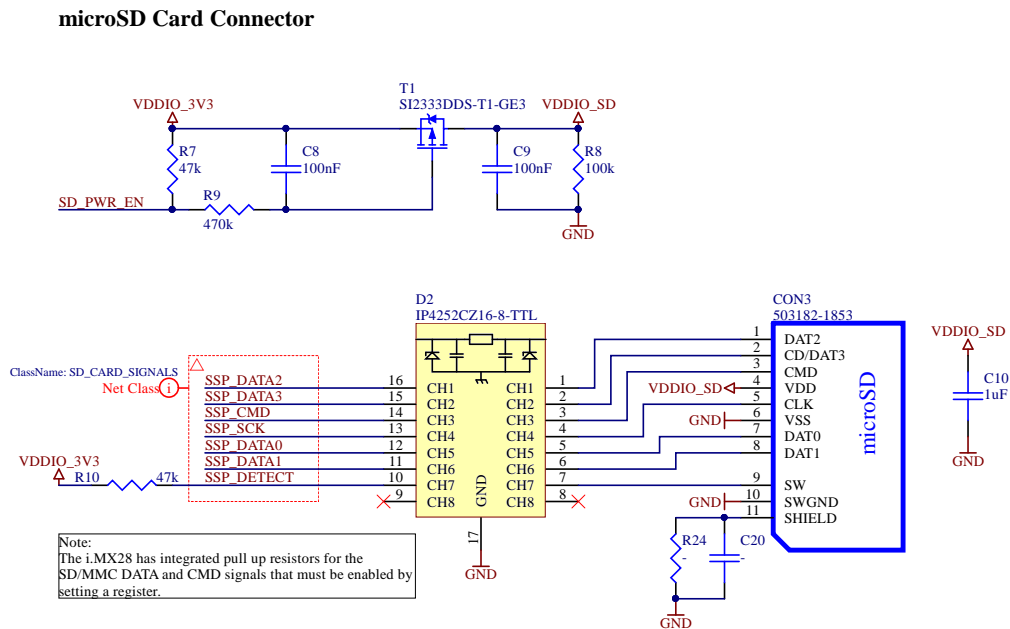
A microSD kártyát a processzor SSP0 perifériájához illesztettem és 4-bites adatbuszt használtam, mivel az elterjedt microSD kártyák általában 8 pólusúak: tápfeszültség, föld, órajel, parancs vonal és 4 adatvonal. A referencia kapcsolásban van említve, hogy olyan memóriakártya tartót kell választani, amelyben van normally-open (alapesetben nyitott) mechanika kapcsoló, amely a kártya behelyezésekor rövidzárú alakul. Igyekeztem olyan kártyatartót választani, amely rendelkezik ilyen kapcsolóval, de az sem lett volna probléma, ha normally-closed kapcsolóval ellátott socket-et választok, viszont akkor a CD (Card Detect) jelet invertálni kellett volna egy egyszerű áramkörrel. Az processzor SSP perifériájában található felhúzó ellenállás az adat és a CMD jeleken, melyeket egy regiszter beállításával kell a szoftverből engedélyezni. Ezért nem terveztem külső felhúzó ellenállásokat ezekre a vonalakra, ezzel is helyet spórolva a NYÁK-on.

Az olyan processzor perifériáknál, ahol a processzorlábakat valamilyen csatlakozóra vezetjük ki (USB, memóriakártya, soros portok), mindig fennáll a veszély, hogy elektrosztatikus kisülés történik rajtuk. Ez legtöbbször akkor történik meg, amikor egy akár néhány kilovoltra feltöltődött ember bedugja vagy kihúzza a csatlakozó párját, vagy memóriakártya esetében a kártyát. Az ilyen nemkívánatos hatásoktól meg kell védeni eszközeinket. Az SD kártyákban van beépített ESD (ElectroStatic Discharge) védelem, azonban a processzor védelméről gondoskodni kell. Utánanéztem, hogy a gyártó milyen megoldásokat ajánl erre a problémára és találtam egy olyan dokumentumot, amely kifejezetten az MMC és SD memóriakártya interfészek védelméről szól [15]. Ez a dokumentum az optimális helykihasználás



nálás érdekében olyan termékeket mutat be, amelyekben integrálva van az ESD védelem és az EMI (ElectroMagnetic Interference) szűrés is, amellyel a nemkívánatos rádiófrekvenciás zavarok elnyomása a cél. A dokumentumban az egyik ajánlott termékcsalád tartalmazza még a szükséges fel- és lehúzó ellenállásokat is, amelyekre nincs szükségem, hiszen a processzorban is megtalálhatóak. Ezért az IP4252CZ16-8-TTL típusú 8-csatornás ESD védelmi eszközt választottam. A négy adatjel, az órajel és a CMD jel mellett a kártya detektálására szolgáló jelet is átvezettem ezen az alkatrészen. Egy védelmi csatorna egy pi-kapcsolású RC-szűrőből és két ESD védő diódából áll.

A megbízható működés érdekében a memóriakártya tápfeszültségét kapcsolhatóvá kell tenni a referencia kapcsolásnak megfelelően, ez látható a 6.5. ábrán. Ez azért fontos, mert a memóriakártyák behelyezéskor nagyobb mennyiségű áramot igényelnek. Kezdetben az SD\_PWR\_EN jel magas állapotban van, így a T1 tranzisztor zárva van. A memóriakártya behelyezésekor az SSP\_DETECT jel alacsony szintű lesz, ez jelzi a processzornak, hogy engedélyezni kell a kártya tápfeszültségét. Ekkor az SD\_PWR\_EN lábat alacsony szintre húzza a processzor, aminek hatására kinyit a T1 tranzisztor és megkapja a memóriakártya a szükséges tápfeszültséget. A kártya eltávolításánál az SSP\_DETECT jel ismét magas szintűvé válik, melynek hatására a szoftver a SD\_PWR\_EN jelet is magas szintre állítja, így a tranzisztor bezár és nem jut el tápfeszültség a kártyatartóig. Az SD\_PWR\_EN jel a processzor PWM3 nevű lábára van kötve. Ha a processzor nem az SD kártyáról bootolna, akkor ez lehetne bármely GPIO láb is.



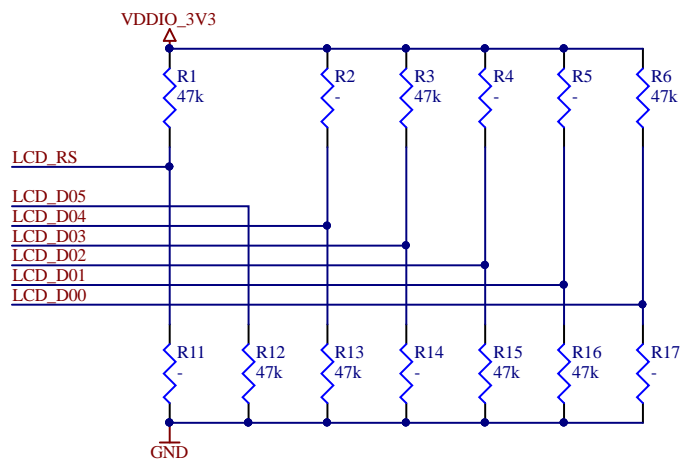
#### 6.2.4. BOOT mód választás

A kívánt bootolási mód kiválasztása kétféle módon történhet. Ha az LCD\_RS pin le van húzva a földre, akkor a a chipben található OTP ROM eFuse bitjeiben beállítottak alapján

dől el a bootolási mód. Amennyiben az LCD\_RS pin fel van húzva a 3.3 V-os tápfeszültségre, akkor az LCD\_DATA[5:0] lábak állapotaival konfigurálható a kiválasztott boot mód. A 6.6. ábrán látható, hogy ellenállásokkal választható ki, hogy melyik LCD pin merre legyen húzva. A kötőjellel jelölt ellenállások nem kerülnek beültetésre, így a jelenlegi konfiguráció az SSP0 periférián található SD kártyáról való bootolást választja ki. Egy prototípus eszköznel fontos, hogy az ilyen jellegű döntések az élesztés, tesztelés során megváltoztathatóak legyenek. Az ellenállások ültetésével minden opció előállítható, ha szükség lenne rá.

### BOOT mode selection

	VOLTAGE	SELECT(BM4)/	BM3/	BM2/	BM1/	BM0/	PORT	BOOT MODE
LCD_D05	D04	LCD_D03	LCD_D02	LCD_D01	LCD_D00			
x	0	1	0	0	1	SSP0	SD/MMC master on SSP0, 3.3 V	



6.6. ábra. BOOT mód választás

## 6.3. Nyomatott áramkör tervezése

Ebben a fejezetben bemutatom a nyomatott áramköri lap tervezésének folyamatát és a gyártásra való előkészítést.

### 6.3.1. Rétegfelépítés kiválasztása és impedancia-kalkuláció

Az i.MX28-as processzorcsaládhoz tartozó PCB tervezési irányelveket a gyártó egy útmutatóban [16] foglalta össze, amelyben a nagyobb odafigyelést igénylő perifériák huzalozásához ír le betartandó szabályokat, tanácsokat. A kártya tervezése a megfelelő rétegfelépítés kiválasztásával kezdődött, az útmutató is erről ír először. Ha a processzornak kevés perifériáját használjuk, és ezek között nem szerepel a külső DRAM illesztéséhez használt EMI interfész, akkor elképzelhető, hogy négy rétegű NYÁK lemezen is meg lehet valósítani a huzalozást. A processzor BGA tokozású és a lábai teljes mátrixot alkotnak, ezért csak a szélső egy-két sorról lehet az IC-vel azonos oldalon kivezetni a lábukat. A többi lábat mindenképpen egy

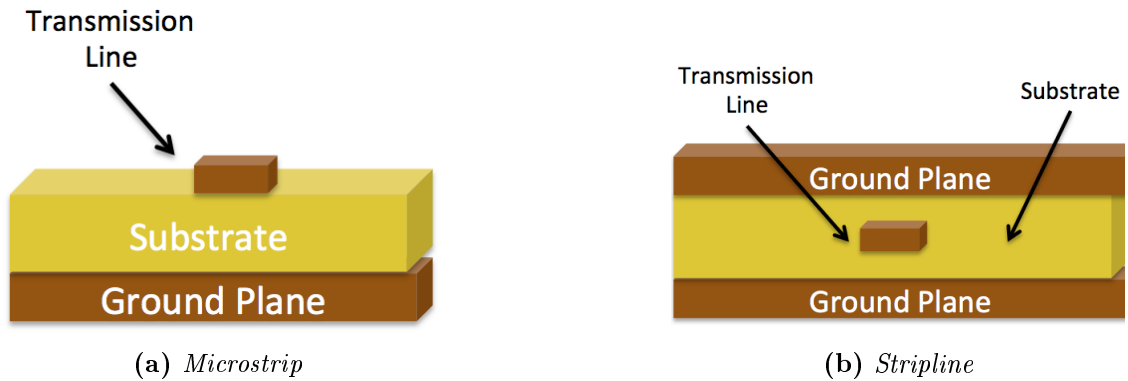
másik rétegen kell kivezetni az IC alól. Ebből kifolyólag a DDR2 memória illesztéséhez legalább két huzalozási rétegre volt szükség. Viszont ezeknek a memória-vezetékeknek meghatározott hullámimpedanciával kell rendelkezniük, amelyhez elengedhetetlen egy összefüggő referencia földréteg közvetlenül a jelvezetékeket tartalmazó réteg alatt vagy fölött. Ekkor lehet a földpotenciál felé visszafolyó áramok útja a legrövidebb és a kialakuló áramhurkok területe a legkisebb. Tehát a két impedancia-illesztett huzalozási réteg a hozzátartozó két földréteggel már elfoglal négy réteget, és ezentúl mindenképpen szükség volt még egy rétegre a tápfeszültségek számára. Ezen indokok alapján döntöttem a 6-rétegű NYÁK lemez használata mellett, amelyet a következő felosztásban terveztem használni:

- 1. réteg (Top oldal) - Ezen a rétegen helyezkedik el a processzor és ez az egyik impedanciaillesztett huzalozási réteg
- 2. réteg - Összefüggő földréteg jelvezetékek nélkül
- 3. réteg - A különböző tápfeszültség kiöntéseket tartalmazó réteg
- 4. réteg - A 3. rétegen nem megvalósítható tápfeszültség kiöntéseket és egyéb jelvezetékeket tartalmazó réteg
- 5. réteg - Összefüggő földréteg jelvezetékek nélkül
- 6. réteg (Bottom oldal) - Ez a másik impedancia-illesztett huzalozási réteg

Hat rétegű NYÁK-ok esetében léteznek más felépítésű modellek is, de az általam választott rétegfelépítés a legelőnyösebb EMC és jelintegritási szempontokból. Ebben a modellben a táp- és a földréteg a lehető legközelebb van egymáshoz, ezzel lehetővé téve kapacitív csatolás kialakulását közöttük, amely magasabb frekvenciákon alacsonyabb impedanciát eredményez. Ezzel akár csökkenthető a tápfeszültség lábak mellé helyezendő hidegítő kondenzátorok száma.

A tényleges tervezés elkezdése előtt a rétegszám kiválasztásán túl a konkrét rétegfelépítést is meg kellett határozni. A DDR2 memória bekötéséhez használt vezetékeknek 50-60  $\Omega$ -os hullámimpedanciával kell rendelkezniük a megfelelő működés érdekében. Magasabb frekvenciás jelek esetében előfordulhat, hogy a vezeték hossza egy nagyságrendbe esik a jel hullámhosszával, ekkor megfelelő illesztéssel a nem kívánt reflexiók elkerülhetőek. Ilyen esetben ezek a jelvezetékek felfoghatók tápvonalként, amelyeknek két fajta huzalozási struktúrája vált általánossá NYÁK tervezési gyakorlatban. Egyik az úgynevezett microstrip, amikor a keskeny vezetőt és a kiterjedt referenciaréteget (általában föld) egy szigetelőréteg választja el egymástól (6.7a. ábra). Másik struktúra a stripline, amelynél két referenciaréteg található a szigetelővel körbevett jelvezető körül (6.7b. ábra). A stripline struktúra kialakításához több rétegre lett volna szükség, ezért én a microstrip elrendezést választottam, mivel ez teszi lehetővé a NYÁK külső rétegein való huzalozást.

A microstrip vezető hullámimpedanciájának kiszámításához több program és internetes kalkulátor is létezik, a hullámimpedancia értékét a következő paraméterek alapján lehet kiszámítani:



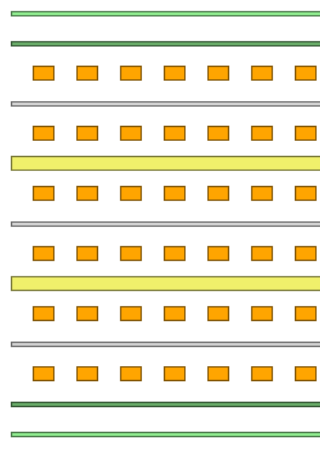
6.7. ábra. Tápvonal huzalozási struktúrák NYÁK lemezen

- A vezető szélessége
- A vezető vastagsága
- A szigetelőréteg vastagsága
- A szigetelőréteg anyagának dielektromos állandója

A vezető szélessége az egyetlen paraméter, amely a huzalozás során még változtatható, a másik három paraméter a PCB felépítéséből adódik. Viszont a vezető szélessége sem választható széles intervallumból, mivel esetemben a processzor és a memória között haladó nagy számú párhuzamos vonalról volt szó. Mindkét integrált áramkör BGA tokozású és lábtávolsága 0.8 mm. Az IC-k lábait alkotó kis gömbök alá 0.3 mm-es kör alakú rézfelületekre van szükség a beforrasztáshoz, így 0.5 mm távolság marad két pad között, ahol el kell férnie egy vezetéknek a megfelelő vezetőtávolságok betartása mellett is. 0.5 mm körülbelül 19 mil-nek felel meg, ami még éppen lehetővé tenné a 6 mil-es vezetőszélességet, 6 mil-es clearance-szel, ami összesen 18 mil széles helyet igényel. A kényelmesebb huzalozás és a processzor útmutatójának ajánlása alapján inkább az 5 mil-es technológiát választottam.

Ezek alapján olyan rétegfelépítést kellett választani, amely a Top és Bottom oldalon huzalozott 5 mil-es vezetéknek 50-60  $\Omega$  közötti hullámimpedancia értéket eredményez. A cégnél megszokott PCB beszállító kínálatában nem szerepelt olyan rétegfelépítés, amely teljesítette volna az impedancia-követelményeket. Ennek oka a túl vastag dielektrikum réteg volt, amelyet a vezető vastagságának és szélességének növelésével lehetett volna elensúlyozni. A vezető vastagságának növelése egyrészt nagy árnövekedéssel és a minimális vezetőszélesség növekedésével jár együtt. A sztenderd 18 mikronos külső rézfólia vastagság mellett a vezeték szélességét körülbelül 10 mil-re kellett volna növelni, amely az előbbieken bemutatott tények miatt lehetetlen volt. Egy másik beszállító viszont tudott ajánlani olyan rétegszerkezetet, amelynél kellően vékony az úgynevezett prepreg szigetelőréteg vastagsága. A 6.8. ábrán látható a kiválasztott rétegfelépítés, amelyet a tervezőprogramban be kellett állítani. A PCB lemez összvastagsága körülbelül 1.5 mm-re adódik, amely standard értéknek tekinthető. A legalapvetőbb 2- és 4-rétegű lemezek is ilyen vastagsággal rendelkeznek. A NYÁK összvastagságának csökkentésével is el lehetett volna érni a vékonyabb prepreg réteget, de ez szintén egy olyan tényező, amely nagyon befolyásolja az árat.

A NYÁK-ok árát legnagyobb mértékben a rétegszerkezet határozza meg, a NYÁK fizikai mérete és az alkalmazott technológia szélsőségektől eltekintve kevésbé befolyásolja az árat.



Layer Name	Type	Material	Thickness (mil)	Dielectric Material	Dielectric Constant
Top Overlay	Overlay				
Top Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.4	Solder Resist	3.4
Top Layer	Signal	Copper	0.7		
Dielectric1	Dielectric	Prepreg	4	FR-4	4.4
Mid-Layer 1	Signal	Copper	1.4		
Dielectric2	Dielectric	Core	12	FR-4	4.4
Mid-Layer 2	Signal	Copper	1.4		
Dielectric3	Dielectric	Prepreg	20	FR-4	4.4
Mid-Layer 3	Signal	Copper	1.4		
Dielectric4	Dielectric	Core	12	FR-4	4.4
Mid-Layer 4	Signal	Copper	1.4		
Dielectric5	Dielectric	Prepreg	4	FR-4	4.4
Bottom Layer	Signal	Copper	0.7		
Bottom Solder	Solder Mask/Co...	Surface Material	0.4	Solder Resist	3.4
Bottom Overlay	Overlay				

6.8. ábra. A kiválasztott rétegszerkezet paramétereit

Ezeknek a paramétereknek az ismeretében már kiszámítható a tényleges hullámimpedancia. Ehhez a számításhoz a Multi-Teknik honlapján [17] található microstrip impedancia kalkulátort használtam. Ennél a kalkulátornál fel van tüntetve, hogy milyen képlettel számol, amelyből látszik, hogy a vezeték vastagságának és szélességének növelésével vagy a szigetelőréteg vastagságának csökkentésével csökkenthető az impedancia. Az előbbieken leírtak alapján 5 mil-es vezetősélességgel (w paraméter) számoltam, ilyen szélességű vezetékkel még viszonylag kis területen lehet meander mintázatot kialakítani, amire szükség lesz az azonos vezetékhozzak eléréséhez. A vezető vastagsága (t paraméter) nem egyenlő a NYÁK lemezen használt 18 mikronos rézfólia vastagságával, a külső fémréteg vastagsága a gyártási folyamat végére körülbelül duplájára nő, ezért számoltam 1.4 mil-lel, ami 35 mikrométernek felel meg. A prepreg réteg vastagsága (h paraméter) a gyártótól származó információk alapján 4 mil, illetve ennek dielektromos állandója 4.4. Ezekkel az adatokkal számolva a 6.9. ábrán láthatóan 53.7  $\Omega$ -os hullámimpedanciájúra adódik egy vezeték. Ez megfelelő abban az esetben is, ha a paraméterek tényleges értéke kis mértékben eltérő a megadott értéktől, ekkor is a szükséges tartományon belül marad az impedancia. A vezető vastagsága tipikusan olyan paraméter, amelyet nem lehet pontosan előre ismerni.

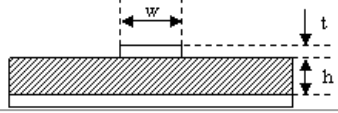
A kapcsolási rajz tervezésénél már említettem, hogy van néhány differenciális jelpár is a DDR2 memória interfészben, jellemzően órajelek. Ezeket a többi vezetékhez hasonlóan 50-60  $\Omega$ -os hullámimpedanciával kell huzalozni, viszont emellé még a 100  $\Omega \pm 10\%$  differenciális impedanciát is biztosítani kell. A differenciális impedancia számításához is a Multi-Teknik oldalán található kalkulátort használtam. A differenciális impedancia számításához is szükség van ugyanazokra a paraméterekre, amelyeket a hullámimpedancia számításánál felsoroltam. Azokon kívül még szükség van a differenciális jelpár két vezetője közötti távolságra is. Amennyiben itt is az 5 mil-es clearance-t használom, akkor a differenciális impedancia 91.9  $\Omega$ -ra adódik, ami még éppen belefér a 10%-os toleranciasávba.

### Microstrip Impedance Calculator

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98h}{(0.8w + t)} \right) \quad T_{pd} = 3.333 \sqrt{0.475 \cdot \epsilon_r + 0.67}$$

Note: valid for (w/h) from 0.1 to 3.0

Dimensional units:  mm  mils

w (trace width) =	5
t (trace thickness) =	1.4
h (dielectric thickness) =	4
er (relative dielectric constant) =	4.4
	
Z <sub>0</sub> (Single Ended Impedance, Ohms) =	53.719
Propagation Delay, T <sub>pd</sub> (ps/inch) =	140.64
Inductance, L (nH/in) =	7.555
Capacitance, C (pF/in) =	2.61817

Note: 1oz = 1.4mils = 0.03556mm

6.9. ábra. Impedancia-kalkuláció a DDR2 memória jeleihez

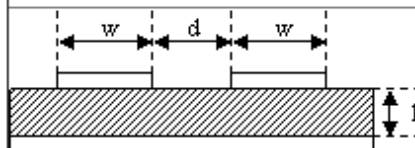
Azonban ha egy paraméter eltér a megadott értékektől, könnyen kívül eshet az impedancia a kívánt tartományon, ezért 10 mil-es vezetőtávolsággal számoltam, melynek eredménye a 6.10. ábrán láthatóan 102.8 Ω.

### Differential Microstrip Impedance Calculator

$$Z_d = \frac{174}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98h}{(0.8w + t)} \right) \left( 1 - 0.48 \exp \left( -0.96 \frac{d}{h} \right) \right)$$

Note: valid for (w/h) from 0.1 to 3.0

Dimensional units:  mm  mils

w (trace width) =	5
d (trace separation) =	10
t (trace thickness) =	1.4
h (dielectric thickness) =	4
er (relative dielectric constant) =	4.4
	
Z <sub>d</sub> (Differential Impedance, Ohms) =	102.759

Note: 1oz = 1.4mils = 0.03556mm

6.10. ábra. Impedancia-kalkuláció a DDR2 memória differenciális jelpárjaihoz

Összességében tehát a gyártó által ajánlott és kiválasztott rétegszerkezet megfelel a feladat bonyolultságának és megvalósítható rajta minden impedancia-illesztési feladat. Az ismertetett paraméterek alapján már el tudtam kezdeni a tényleges NYÁK tervezést.

### 6.3.2. Huzalozás

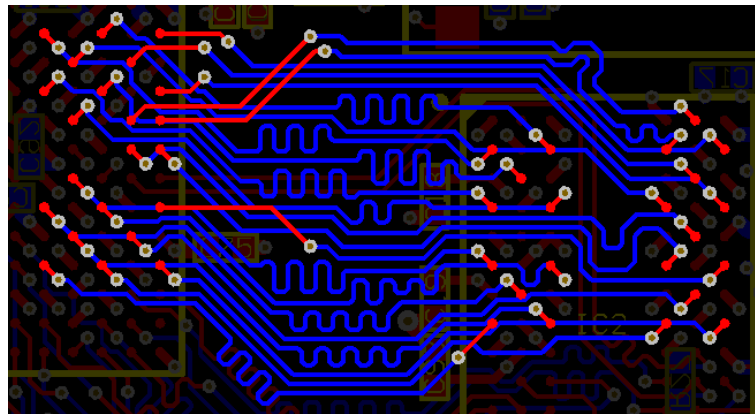
Ez a tervezési folyamat is az alkatrészek elhelyezésével kezdődött. Két fontos alkatrész van, amelyeknek kritikus az egymáshoz képesti pozíciója, ez a processzor és a memória. Az első kérdés az volt, hogy a két integrált áramkör azonos vagy ellentétes oldalon kapjon-e helyet. A memóriák lábkiosztása azonos, ezért a processzor EMI periferiájának lábkiosztása dönt, hogy hogyan praktikusabb az elhelyezés. Mindkét lehetőséget megvizsgáltam és az azonos oldali elhelyezés mellett döntöttem, mivel fordított esetben a két IC távolabb eső lábait kellett volna összekötni. Ennél az interfésznél fontos szempont, hogy az egy csoportba tartozó jeleknek közel azonos hosszúaknak kell lenniük. Ekkor viszont az egymáshoz közelebbi lábak között kellett volna megnövelni a vezeték hosszakat, amelyek így nagyobb helyet foglaltak volna el. Ez pedig az őket kikerülő vezetékek meghosszabbításával lett volna elérhető, amelyhez lehetséges hogy újra hozzá kellett volna igazítani a rövidebb vezetékeket. Tehát körülbelül elhelyeztem a két IC-t egymáshoz képest olyan orientációval és olyan távolságban, amelyről úgy láttam, hogy logikusan kihuzalozható lesz. Elhelyeztem még a felső oldalon NYÁK egyik sarkára a microSD kártya foglalatot, úgy, hogy a NYÁK széle felől kényelmesen be lehessen dugni a memóriakártyát. Ekkor már volt egy előzetes körvonala a PCB-nek, így ehhez igazodva elhelyeztem a két interfészkártya felé menő csatlakozót szimmetrikusan az alsó oldalra.

#### DDR2 memória

Ez után elkezdtem a legkritikusabb és legidőigényesebb feladatot, amely a DDR2 memória bekötése volt. A kapcsolási rajz tervezésénél már bemutattam, hogy milyen jelcsoportokra oszlik a memória-interfész. A korábban már hivatkozott AN2910 [13] dokumentum ezekre a jelcsoportokra ajánl egy huzalozási sorrendet, amely az adatvonalak bekötésével kezdődik. Ez a csoport a 16 párhuzamos adatvezetékéből és a hozzájuk tartozó strobe és mask jelekből áll. Az egy byte-hoz tartozó adatvonalak és a saját strobe és mask vonalaik hosszának a lehető legközelebb kell esniük egymáshoz, illetve az egész jelcsoport legrövidebb és leghosszabb vezetékének hossza között legfeljebb 500 mil különbség lehet. Erre a maximális eltérésre is be lehet állítani szabályt a tervezőprogramban, amely mindig jelzi azokat a vezetékeket, amelyek még nem megfelelő hosszúak a többi vezetékhez képest. A legtávolabbra menő vezetékeket a lehető legrövidebb úton kell elvezetni, majd később az ezek által meghatározott hosszra kell megnövelni a rövidebb vezetékek hosszát. A vezetékek hosszának növelése olyan módon lehetséges, hogy meander mintázatot alakítunk ki egy szakaszon, amíg a kívánt hosszt el nem éri. Ehhez is biztosít beépített eszközt a tervező program, ami viszont egy kissé nehézkesen használható. Arra kellett még figyelni, hogy minden jel ugyanannyiszor váltson réteget, így minden jelútba ugyanannyi viának (rétegek közti fémes átvezetés) kell kerülni. Mivel mindkét IC-t a felső oldalra helyeztem el, és a huzalozás nem volt megoldható kizárólag a felső oldalon, így minden jelet a processzornál átvezettem az alsó oldalra, majd a memóriánál vissza a felső oldalra. A BGA tokozású alkatrészek lábainak kivezetéséhez használt viák elhelyezésének több módja is lehetséges. Van olyan technológia, amikor a via a paden helyezkedik el, így nem foglal helyet a padek

között. Azonban ez meglehetősen drága módszer, mert fel kell tölteni fémmel a viákat, hogy forrasztáskor ne szívják el az ónt a forrasztási felületről. Ezek a 0.8 mm-es lábtávolságú BGA tokok még megengedik, hogy a padek között viák helyezkedjenek el. Ezeket úgy lehet szépen elhelyezni pontosan a négy pad közötti tér közepére, hogy lokális gridet (rács) alkalmazunk az IC alatti területen. Erre azért van szükség, mert a tervezés általában 1 mil-es griden történik, az IC-k lábtávolsága pedig milliméterben kerek szám.

Az adatjeleket tartalmazó csoportba tartozott továbbá a két strobe jelpár, amelyeket differenciálisan kellett huzalozni, ezeknél kifejezetten kellett figyelni, hogy az összetartozó vezetékek hossza ne térjen el egymástól 25 mil-nél nagyobb mértékben, de igyekeztem ezt a különbséget 10 mil alatt tartani. Végül az egész adat-jelcsoportban a maximális hossz eltérés 60 mil-re adódott, ami teljesíti az ajánlást. Az adat jelcsoport huzalozása a 6.11. ábrán látható.



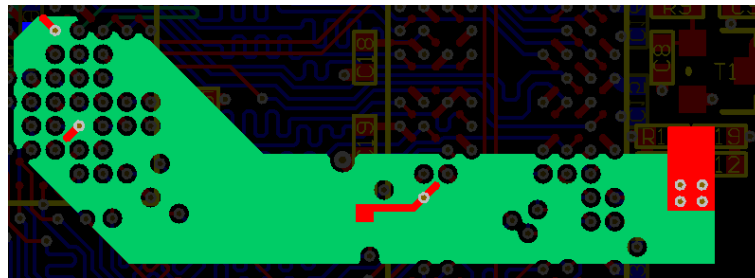
**6.11. ábra.** A DDR2 memória-interfész adat jelcsoportjának huzalozása

Az adatvezetékek után következett az útmutató alapján a cím- és parancsvezetékek bekötése, mivel ez a másik sok párhuzamos jelből álló csoport. Erre a csoportra is ugyanazok a szabályok vonatkoztak, mint az adatvezetékek csoportjára, miszerint minden jelnek 50-60  $\Omega$ -os hullámimpedanciával kell rendelkeznie, amelyet a rétegfelépítés és a beállított szabályok automatikusan biztosítottak. Emellett a vezeték hosszakat ezen a csoporton belül is a lehető legjobban össze kellett hangolni, viszont az adatvezetékek átlagos hosszához nem szükséges igazodni. Továbbra is fontos feladat volt, hogy a jelek ugyanazonokon a rétegeken haladjanak és lehetőleg nagyjából egyszerre lépjenek át másik rétegre, ez is csak az IC-kből való kilépésnél történjen. Egyéb helyeken ha elkerülhető, ne legyenek felesleges rétegváltások, főként ne impedancia szempontjából illesztetlen rétegekre. Ezek után bekötöttem a maradék vezérlőjeleket, majd végül az órajelet is differenciális párként. Az órajel esetében még két szempontot kellett figyelembe venni, miszerint ennek a jelpárnak nem szabad réteget váltania, ehhez úgy van kialakítva mindkét IC lábkiosztása, hogy ez könnyedén megtehető legyen. Másik szempont, hogy az órajelvezetékek legyenek a lehető legtávolabb a többi vezetéktől. Minden jelvezeték bekötése után kiszámoltam a kapcsolási rajzál már említett EMI\_DDR\_OPEN jel hosszát, melyet az egyik belső rétegen valósítottam meg.

A DDR2 memóriáknál fontos feladat továbbá a VREF feszültség megfelelő előállítása (6.2.1 fejezet), valamint eljuttatása a NYÁK-on a szükséges pontokra. Mivel csak egy me-



mória van a rendszerben, ezért a referencia-feszültséget a kapcsolási rajznál leírtak alapján az 1.8 V-os tápfeszültségből állítom elő egy ellenállásosztóval. Ha több memória lenne (4 vagy annál több), akkor ez már nem lenne jó módszer a VREF előállítására, hanem valamilyen tápegységgel kellene előállítani. A 6.12. ábra jobb oldalán látható a VREF előállítása, majd eljuttatása a memória és a processzor VREF lábához. Igyekeztem a felhasználási helyekhez közel előállítani, de a két IC között a jelvezetékek miatt már nem volt hely. Erről a feszültségről elég csekély a fogyasztás, egy 20-30 mil-es vezetékkel ajánlott bekötni, azonban én egy szélesebb poligonnal oldottam ez meg. Erre azért volt szükség, mert a processzornál a külső memória interfész területén szinte minden láb mellett már volt egy-egy via, amelyek között csak egy 5-6 mil-es vezeték lehet áthúzni, és ez a teljesen átmenő furatos via miatt minden rétegen korlátozott. A VREF feszültséget a forrásnál és minden célpontjánál érdemes egy-egy 100 nF-os kerámiakondenzátorral hidegíteni, szűrni. Ezért a memória mellé a felső oldalon elhelyeztem egy kondenzátort a VREF lábhoz a lehető legközelebb, illetve a processzor távolabbi VREF lábához közel az alsó oldalra egyet. A memória bekötése után elhelyeztem annyi 100 nF-os kondenzátort a tápfeszültség lábak mellé, amennyit a PCB-n maradt hely megengedett.

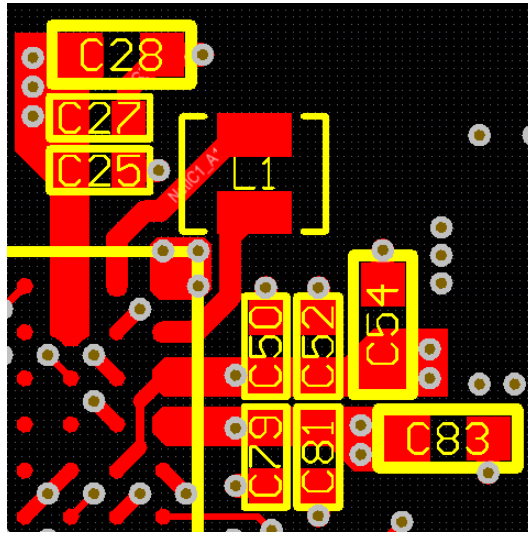


6.12. ábra. A DDR2 memória referencia-feszültségének előállítása

## Power Management Unit

A következő lépés a processzor PMU-jához kapcsolódó alkatrészek elhelyezése és huzalozása volt. Az AN4215 dokumentum [16] ehhez is felsorol néhány tervezési irányelvet, betartandó szabályt. Első lépésként a DC-DC konverter földjét a DCDC\_GND pinen keresztül legalább két vián át közvetlenül a pin mellett a nagy kiterjedésű földréteghez kellett kötni az alacsony impedanciás út biztosítása érdekében, mivel viszonylag nagyobb értékű áramot kapcsol magas frekvenciával. A DCDC\_GND pin az IC egyik sarkán helyezkedik el, így körbe tudtam venni három viával és egy kis rézkiöntéssel (6.13. ábra L1 tekercs alatt). Ezután a DC-DC konverterhez tartozó tekercset kötöttem be, amit a lehető legközelebb helyeztem el az IC-hez és a megengedhető legvastagabb vezetékkel kötöttem be, amely 15 mil széles volt (6.13. ábra L1). Ez megfelel az útmutatóban ajánlott 15-20 mil-es követelménynek. Az útmutató előírja továbbá, hogy a tápfeszültség pineket legalább 8 mil-es furatátmérőjű viákkal ajánlott a tápréteghez kötni az alacsony impedanciás út eléréséhez. Az egész PCB-n 8 mil furatátmérőjű viákat használtam 16 mil átmérőjű fémgűrűvel. A DC-DC átalakító minden kimenetéhez tartozik 5 darab kis kerámia kondenzátor, amelyeket igyekeztem közel elhelyezni az adott tápfeszültség forrásához, az azonos méretűeket egymás alá helyeztem el

a NYÁK két oldalán. Ezeket a lehetőségekhez mérten vastag vezetékkel kötöttem hozzá a processzor padjeihez. A 6.13. ábrán látható néhány ilyen elrendezés is. Tehát a DC-DC konverter kimeneteihez tartozó szűrő- és puffer-kondenzátorokat bekötöttem, mivel ezek kritikusak a tápegység stabilitása szempontjából, viszont a többi tápfeszültség láb mellé még nem helyeztem el a hidegítő kondenzátorokat. Ezeket a tervezés későbbi fázisában raktam a helyükre, mikor már a huzalozás készen volt, és kirajzolódott, hogy hova hány 100 nF-os kondenzátort lehet elhelyezni.



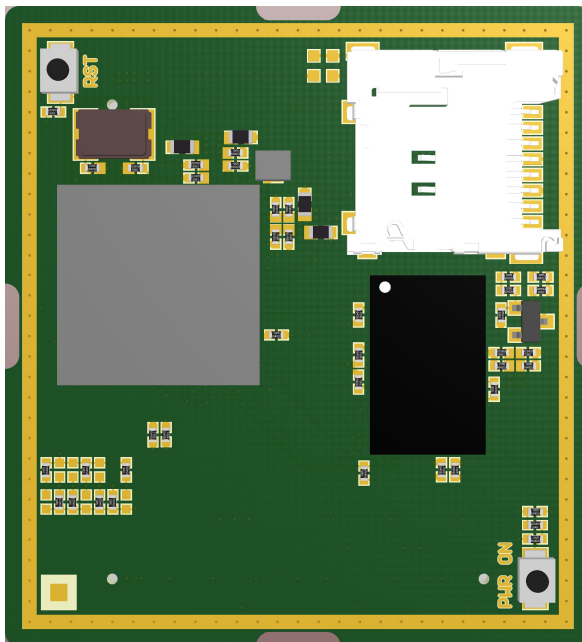
6.13. ábra. A PMU és környezetének egy része

### Az áramkör többi részének huzalozása

Ekkor következett a microSD kártya bekötése, amely nem igényel illesztett impedanciát, így a még kihasználatlan belső jelrétegen vezettem ki a jeleit a processzor alól. Az ESD védelmet szolgáló korábban bemutatott passzív szűrőkkel is ellátott alkatrészt a kártyatartó pinjeihez közel helyeztem el, a foglalattal ellentétes oldalra. A kártyatartó alatt van egy olyan terület, ahova nem ajánlott vezetékeket tervezni, mivel ott a kártya behelyezésekor a foglalat fém részei leérhetnek a PCB-re. Sok csatlakoztatás hatására megkophat a forrasztásgátló lakk réteg és esetleg nem kívánt rövidzár alakulhat ki a csatlakozó alatt futó vezeték és valamelyik SD kártya jel között.

Végül bekötöttem azokat a jeleket is, amelyek kapcsolatot teremtenek a külvilággal és kimennek az alsó oldali csatlakozókra, ahonnan az interfészkártyán route-olódnak tovább a megfelelő kártyához. A NYÁK két ellentétes sarkába elhelyeztem a bekapcsoló- és a reset gombot is. Végző lépésként a kártya körvonala mentén az összes rétegen létrehoztam egy GND gyűrűt, amelyeket viákkal is összekötöttem. A felső rétegen lévő rézgyűrű fölött kinyitottam a forrasztásgátló lakk réteget. Ez a megoldás segít csökkenteni az elektromágneses kisugárzást, illetve ESD szempontból is ellenállóbbá teszi a kártyát. Elhelyeztem még a PCB-re fiduciális jeleket, amelyek a beültető gépnek nyújtanak segítséget a pozícionálás során. Ha nagyobb méretű lenne a NYÁK, akkor a kis lábtávolságú alkatrészek mellé is kellene valamilyen fiduciális jelet tenni, hogy ezeket a nagyon pontos pozícionálást igény-

lő alkatrészeket is precízen a helyére tudja rakni a beültető gép. Ez a kártya 41 mm x 45 mm-es nagyságú lett, így ide elég volt a kártya sarkán elhelyezett jelzés. A 6.14. ábrán látható a megtervezett áramkör felülnézeti képe. A körvonalon lévő 4 bevágás okáról a 6.3.3 fejezetben esik szó.



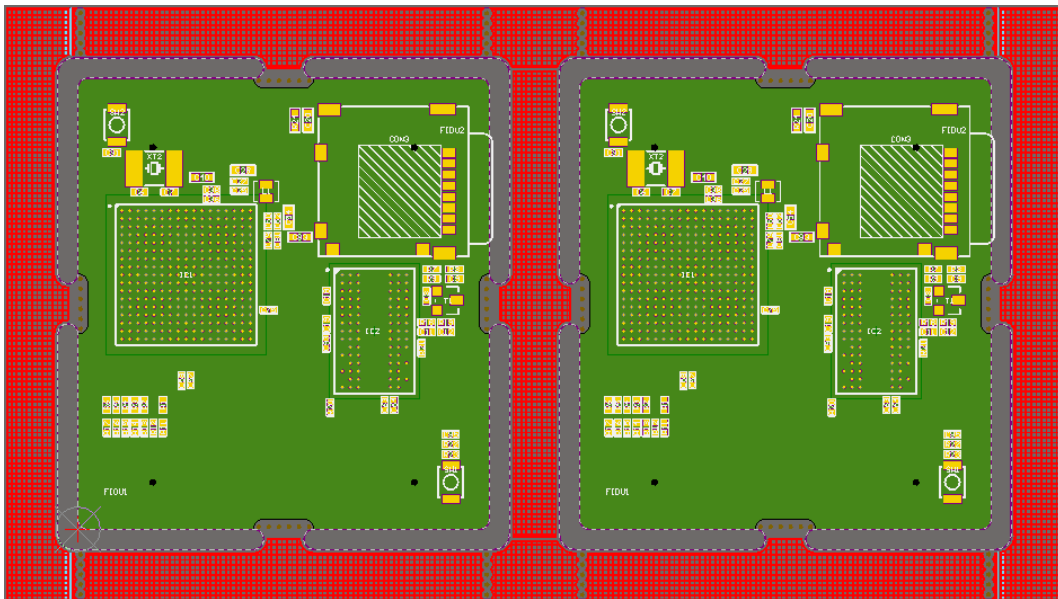
6.14. ábra. A processzoros kártya felülnézeti képe a terv alapján

### 6.3.3. Gyártásra való előkészítés

A NYÁK gyártásba adása előtt azonban még egyeztetni kellett a beültető céggel, hogy milyen technikai keret kerüljön a NYÁK-ok köré, illetve látnak-e valami olyat a gyártófájlokon, amelyek miatt nem lehetséges valamelyik alkatrész beültetése. A legegyszerűbb technikai keret, amely kontúrmarással készül és csak kis fülekkel kapcsolódik a PCB-hez, ami így könnyen kitörhető belőle. Prototípus eszköz lévén két darabot szeretnénk volna legyárttatni, ezért két PCB-t kellett közös kerettel ellátni. Ehhez a panelizálási folyamathoz nyújt támogatást a tervezőprogram Embedded Board Array funkciója. Egy konfigurációs felületen be kell állítani a panelizálandó PCB elérési útvonalát, majd megadható, hogy hány sorba és hány oszlopba legyen rendezve a panel. Erre a PCB-be is be kellett állítani a layerstack-et, amit a tervezéshez használtam, különben jelez a program, hogy nem egyezik a kettő. Meg kellett még adni, hogy a NYÁK-ok között vízszintes és függőleges irányban mennyi hely legyen. Mindkettőt 9 mm-re állítottam, ez a szám abból adódik, hogy a beültetők általában 5 mm-es keretet kérnek, melyeket 2 mm átmérőjű bemarással kell elválasztani a PCB-ktől. Ha a NYÁK-terv módosul, akkor ide befrissíthetőek a változtatások.

A 6.15. ábrán látható a panelizált PCB-terv. Mindkét kártya 4 ponton keresztül kapcsolódik a kerethez, a kártya körvonalánál viasorral könnyítve a későbbi keretből való kitörést. A kártya kivágásoknál 1 mm sugarú köríveket használtam, mivel a kontúrmaró nem tud 90°-os szöget vágni. Ha a későbbiekben mégis több darabot kellene gyártani a NYÁK-ból,

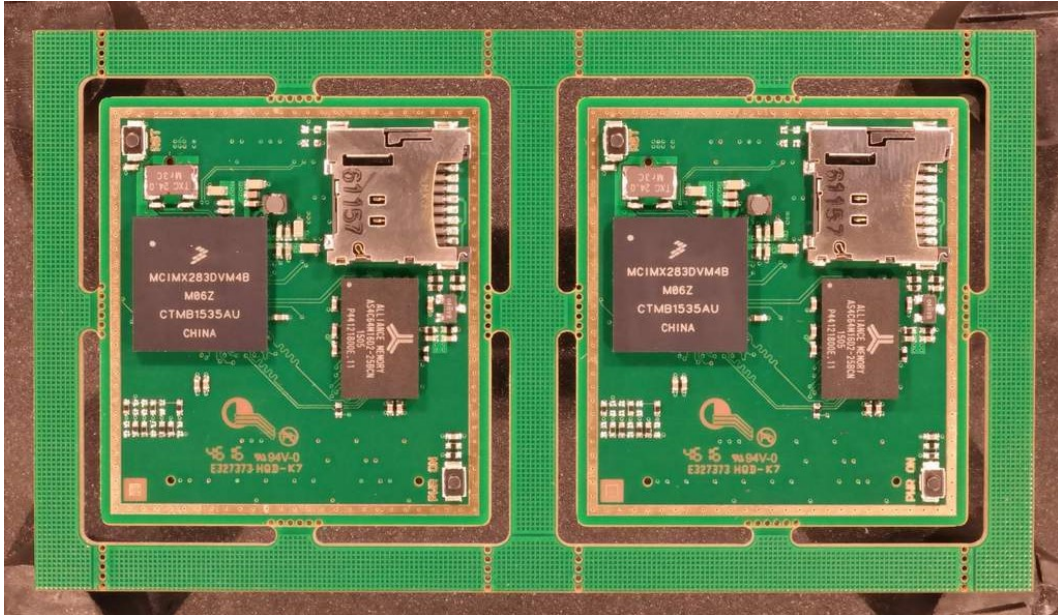
akkor ezt a tervet kellene módosítani hozzá. Mivel elég kis méretű egy PCB, ezért valószínűleg elég sok férne el egy panelra, amit még az ültetőgépek be tudnak fogni. A beültető céggel kellett továbbá azt is egyeztetni, hogy a BGA tokos alkatrészek esetén mekkora legyen a padeken a rézfelület, mekkora mértékben legyen kinyitva a forrasztásgátló lakk a padek körül, illetve hogy mekkora legyen a padre felviendő forrasztás mérete. A forrasztás mennyisége ilyen kis lábtávolság esetén fontos paraméter, hiszen elégnek kell lennie a megfelelő forrasztáshoz, de nem lehet túl sok sem, mert akkor fennáll a veszély, hogy lefolyik a padról és esetleg rövidzárat okoz két szomszédos láb között. A beültető 0.3 mm-es átmérőjű padet javasolt 0.45 mm-es forrasztásgátló lakk nyitással és 0.4 mm-es pasztázással, ezt hívják túlnyomtatásos technikának.



6.15. ábra. A processzoros kártya panelizált terve

A gyártási folyamathoz sokféle kimeneti állományra van szüksége a különböző gépeknek. A kimeneti fájlok kezeléséhez is nyújt segítséget a tervezőprogram, melynek segítségével csak egyszer kell felparaméterezni az adott fájlokat, amelyeket bármikor gombnyomásra újra lehet generálni, ha változik a terv. A PCB gyártáshoz alapvetően minden gyártandó réteghez kell egy-egy gerber fájl, valamint egy fűrófájl, amely a furatok középpontjának koordinátáit és a furat átmérőjét tartalmazza. A NYÁK beültetéséhez kézi ültetés esetén nincs szükség különösebb dokumentációra, csak egy olyan fájlra, amelyen jól látszik, hogy hova milyen alkatrészt kell ültetni és milyen orientációval. A GSM, a wM-Bus és az interfész kártya esetén lehetséges megoldás a kézi beültetés, talán a rádiós modulok forrasztása okozhat nehézséget, de kis példányszám esetén megoldható. A processzoros kártya beültetése viszont kizárólag géppel kivitelezhető, amelyhez először stencil gyártására van szükség. A stencil egy olyan lemez, amin ott vannak kivágások, ahol forrasztás van szükség a PCB-n. Ez után az úgynevezett Pick-and-Place fájl alapján tudja a beültető gép elhelyezni az alkatrészeket a felpasztázott lemezen. Az alkatrészek beszerzését pedig a BOM (Bill of Materials) segíti, amely felsorolja, hogy mely alkatrészből hány darabra van szükség. Az alkatrészeknek lehetnek egyéb paraméterei, mint például a beszállító és a hozzá tartozó

cikkszám. Ha ezeket az adatokat is tartalmazza a BOM lista, akkor az alapján könnyen elvégezhető az alkatrészbeszerzés. Arra kell figyelni, hogy gépi ültetés esetén a kisebb szalagtáras alkatrészekből (tipikusan ellenállások, kondenzátorok) 10-20 darabbal többet kell küldeni az ültetőgépbe való befogáshoz. A 6.16. ábrán látható a beültetett két processzoros kártya a technikai keretben, amelyből a képen látható kikönnnyítések miatt egyszerűen kitörhető anélkül, hogy a NYÁK nagyon megcsavarodna közben.



**6.16. ábra.** A processzoros kártya beültetés utáni képe

## 7. fejezet

# Az interfészkártya tervezése

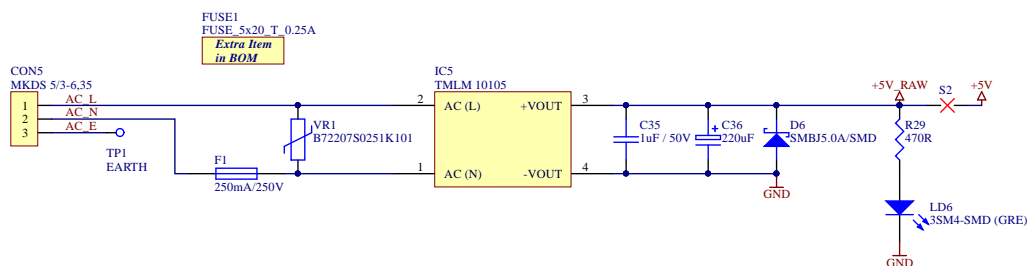
Ebben a fejezetben bemutatom a rendszer alapkártyáját megvalósító interfészkártyát. Ennek a kártyának a megtervezéséhez már ismerni kellett, hogy pontosan milyen jeleket kell átvezetni az egyes kártyák között és milyen tápfeszültségeken milyen fogyasztás várható.

### 7.1. Kapcsolási rajz tervezése

Az interfészkártya egyik fő feladata, hogy megfelelő tápellátást biztosítson a rendszer minden eleme számára. A 3.2.3 fejezetben már említettem, hogy a központi egység hálózati feszültségről üzemel, mivel a későbbi telepítési helyeken az lesz elérhető energiaforrásként. A váltakozó hálózati feszültségből első lépésben egy AC/DC konverterrel 5 V-os egyenfeszültséget állítottam elő. Azért választottam az 5 V-ot, mivel ennél nagyobb feszültségre biztosan nincs szükség a rendszerben, viszont ebből elő lehet állítani a szükséges alacsonyabb feszültség szinteket, akár kapcsolóüzemű tápegységgel, akár lineáris regulátorral. Az 5 V előállítása mellett szólt még továbbá, hogy mivel úgy is szükség volt USB kommunikációra a processzorral, így a csatlakozón érkező 5 V-ot is fel lehet használni tápforrásként a fejlesztési fázisban. A PC-ről felvehető 500 mA-es maximális áram valószínűleg elég a központi egységnek, esetleg a GSM modul nagyobb áramcsúcsait nem tudja kiszolgálni. Ennél viszont sokkal fontosabb, hogy a hálózati feszültség nélkül is tud üzemelni, ha nem is teljes funkcionalitással, de egy-egy rész fejlesztéséhez elég. Ez azért előnyös, mert amikor csatlakoztatva van a hálózatra az interfészkártya, akkor be kell zárni a leföldelt dobozba a kártyákat. Lezárt dobozban pedig nem lehetséges a jelek oszcilloszkóppal vagy logikai analízátorral való vizsgálata, multiméterrel történő mérések, illetve a kártyákon található fejlesztést segítő gombok és LED-ek használata. Tehát a rendszer alapvetően a hálózati váltakozó feszültségből előállított 5 V egyenfeszültségről üzemel, viszont ha csatlakoztatva van az USB kábel, akkor arról is képes járni. Meg kellett oldani, hogy ha mindkét 5 V-os forrás jelen van, akkor se történjen egymásba való visszatáplálás.

A 7.1. ábrán látható az AC/DC átalakító és környezetének kapcsolási rajza. A CON5-tel jelölt csavaros sorkapcsón kapja meg a NYÁK a fázis- és nullvezetőt, valamint a földelést. Ennél a csatlakozónál fontos volt, hogy kibírja a hálózati feszültséget a kontaktusain, illetve a lábtávolsága is elegendően nagy szigetelési távolságot nyújtson. A nagyon elterjedt

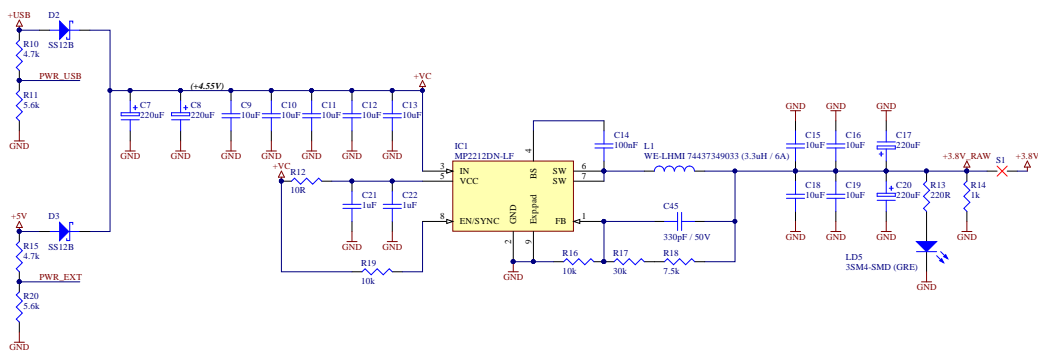
standard sorkapcsok rasztere 5 mm, ami általában 250 V-os feszültséget enged meg, ezért én egy 6.35 mm-es lábtávolságú csatlakozót választottam. 230 V esetén a PCB-n betartandó vezető-távolság például attól is függ, hogy a földelés be van-e kötve az eszközbe. Mivel a hálózati feszültségen akár kilovoltos nagyságú tüskék is előfordulhatnak, ezért ajánlott a lehető legnagyobb szigetelési távolságot tartani. A földelés a csatlakozóról egy M3-as méretű furatra kerül, amelyen keresztül hozzá lehet csavarozni a doboz falához, ezzel biztosítva a doboz biztonságos érintését. A fázis és a nullvezető pedig az AC/DC konverter (IC5) bemenetére kerül, amelynek egy TRACO Power gyártmányú TMLM 10105 típusú tápegységmodult választottam. Ez egy fix 5 V-os kimenetű, 2 A-es maximális terhelhetőségű, NYÁK-ba ültethető tápegység, amely rövidzár védelemmel is el van látva, valamint kimeneti terhelés hiányában is tud működni. A tápegység bemeneti és kimeneti oldala között az izolációs feszültség 3 kVAC, amelyet 60 másodpercig bír elviselni. Továbbá található a bemeneti körben egy 250 mA-es lomha kioldású olvadóbiztosító (F1), amely a PCB tervezése során került az alsó ágba. Ez azért történt meg, mert így jobban lehetett kihuzalozni ezt a részét az áramkörnek, és nagyobb távolságokat engedett meg ez az elrendezés az egyes vezetékek között. A fázis és a nullvezető között szerepel egy MOV (metal-oxide varistor) (VR1) túlfeszültség-védelmi eszközként. A tápegység kimenetén puffer-kondenzátorok, TVS (Transient Voltage Suppressor) dióda és a tápfeszültség jelenlétét visszajelző LED található. Látható még a kapcsolási rajzon egy S2-vel jelölt komponens, amely a tápáramkör élesztése során a mögötte álló áramkört ideiglenesen leválasztja a tápegység kimenetéről. Ez a PCB-n két egymáshoz közel elhelyezkedő kis fém felület, melyek könnyen összefolytathatóak ónnal. Amennyiben az élesztésnél meggyőződünk a tápegység helyes működéséről, és valóban 5 V-os feszültség alakult ki a kimenetén, csak akkor lehet összekötni rövidzár-  
rá ezt a két padet, melynek hatására az áramkör 5 V-ról üzemelő részei is tápellátáshoz jutnak.



7.1. ábra. Az AC/DC átalakító használata

Az 5 V-os tápfeszültségből egy kapcsolóüzemű tápegység segítségével 3.8 V-ot állítottam elő, amelynek szükségességét elsősorban a GSM modul indokolta. Mivel ezt az igényt már a tervezés elején is ismertem, így a processzoros kártya fő tápforrásának kiválasztásánál (6.2.2 fejezet) is felmerült lehetőségként a 3.8 V-ról való megtáplálás, és végül emellett döntöttem. Amennyiben a két 5 V-os forrás (AC/DC tápegység kimenete vagy USB csatlakozó) egyikén megjelenik a feszültség, akkor ebből a kiválasztott kapcsolóüzemű tápegység előállítja a kívánt 3.8 V-os feszültséget. Viszont elképzelhető, hogy egy időben mindkét 5 V-os forrás jelen van, ezért meg kellett oldani, hogy ne folyhasson áram az egyik táp felől a másikba.

Ennek elkerülése érdekében mindkét forrásra egy-egy soros diódát (D2, D3) terveztem. Ez sajnos azzal a hátránnyal jár, hogy a dióda nyitófeszültségével kevesebb feszültség kerül a tápegység bemenetére. A lehető legkisebb feszültségvesztés érdekében Schottky-diódát választottam, amelynek legfeljebb 0.45 V a nyitófeszültsége az általános diódák 0.6-0.7 V-jához képest. A MP2212DN-LF típusú step-down convertert választottam ki a feladatra, 3 A-es maximális kimeneti árammal. A kimeneti feszültsége 0.8 V-tól a bemeneti feszültség 90%-áig állítható, ami megfelelő volt a feladatra, hiszen körülbelül 4.5 V-ból kellett 3.8 V-ot előállítani, ami 4 V alá esik. 5 V-os bemeneti feszültség mellett már 300 mA-es kimeneti áramnál eléri a 95%-ot a tápegység hatásfoka. A 7.2. ábrán látható a tápegység környezetének kapcsolási rajza. A tápegység bemenetén két nagyobb értékű tantál kondenzátor és több kisebb értékű kerámia kondenzátor, melyek dielektrikumának anyaga X7R jelölésű. Az X7R anyagú kondenzátorok értéke széles hőmérséklet-tartományon belül ( $-55^{\circ}\text{C}$ -tól  $+125^{\circ}\text{C}$ -ig) csak  $\pm 15\%$ -kal változhat, valamint az ekvivalens soros ellenállásuk is alacsony. A VCC láb táplálja a belső vezérlőáramkört, amely legfeljebb 6.5 V-ot visel el, így az ennél nagyobb bemeneti feszültségek esetén nem lehet közvetlenül a VCC lábba is rákötni az átalakítandó feszültséget. Esetemben ez nem jelentett problémát, így azt is a bemeneti 4.5 V körüli feszültségre kapcsoltam, illetve az IC engedélyező lábát is ehhez kell felhúzni, amennyiben be szeretnénk kapcsolni a tápegységet. A kívánt kimeneti feszültséget egy ellenállásosztóval lehet beállítani, amit úgy kell méretezni, hogy a FB (feedback) lábon 0.8 V alakuljon ki. Az FB pin és a föld közötti ellenállásra (R16) megadja az adatlap, hogy 10 k $\Omega$  legyen, ez alapján pedig ki lehet számolni a másik ellenállás értékét, amely 37.5 k $\Omega$ -ra jött ki. Ez nem szabványos ellenállás-érték, ezért két sorosan kapcsolt ellenállásból állítottam elő. A tápegység kimenetén lévő tekercs méretezéséhez is nyújt segítséget az adatlap, illetve ajánl néhány konkrét típust is. A kimeneti kondenzátorok segítenek csökkenteni a feszültség-ingadozást. Található még a kimeneten egy tápfeszültség-jelző LED és az előbbieken bemutatott áramkört megszakíthatóvá tévő két fémfelület.



7.2. ábra. Kapcsolóüzemű tápegység 3.8 V előállításához

3.3 V-os tápfeszültséget nem állítok elő ezen a kártyán, azt a processzoros kártya állítja elő saját magának, és onnan van visszavezetve az interfészkártyán keresztül a GSM és a wM-Bus kártyához. Ezen a két kommunikációs kártyán a jelek szintillesztéséhez van szükség a 3.3 V-ra. Az interfészkártyán keresztül valósulnak meg a kapcsolatok a központi egység többi kártyája között. A GSM és a wM-Bus kártya teljesen azonos interfésszel rendelkezik.



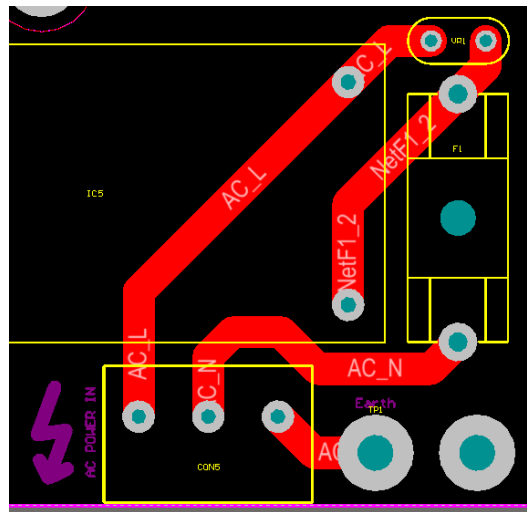
Ezen keresztül megkapják a szükséges tápfeszültségeket, reset- és engedélyező jeleket a processzor felől, illetve a soros kommunikáció is ezen az interfészen keresztül valósul meg a fő processzor és a rádiós modulok között (wM-Bus modulnál közvetetten).

Az interfészkártyára került egy egyszerű felhasználói interfész, a doboz oldalán elérhető nyomógombokkal és különböző színű LED-ekkel. Dobozon belül helyet kapott továbbá egy buzzer is, amellyel hangjelzést lehet kiadni, például az eszköz bekapcsolásakor. A processzor egyik UART perifériáját kivezettem az interfészkártyára, ahol hardveresen választható, hogy RS232, RS485 vagy RS422 fizikai rétegen szeretnénk kívülről használni. A processzorhoz való USB-n keresztüli hozzáféréshez is ezen a kártyán kapott helyet az USB csatlakozó a megfelelő védelemmel ellátva. Az USB VBUS vonalán van egy ferritgyöngy, utána pedig egy varisztor és néhány kondenzátor. A két adatvonalon pedig ESD védelem és egy-egy soros 27  $\Omega$ -os ellenállás. Ennek az alapkártyának a fő feladata mégis a rajta lévő kártyák közötti összeköttetések megvalósítása, tehát mindhárom, a központi egység részét képező PCB (GMS, wM-Bus és processzoros kártya) csatlakozói és rögzítőfuratai is erre a kártyára kerültek rá. Amint említettem korábban, a két kommunikációs kártya azonos kiosztású tüskesoros csatlakozót kapott, a kis méretű processzoros kártya pedig két darab kis raszterű board-to-board csatlakozót. A processzoros kártyának így nincs szüksége egyéb rögzítési módra.

## 7.2. Nyomatott áramkör tervezése

A nyomatott áramkör ugyanolyan standard 4-rétegű lemezre készült, mint a kommunikációs kártyák, mivel ezen semmilyen különleges igény nem merült fel, amely több réteget vagy más rétegszerkezetet igényelt volna. Az alkatrészek elhelyezése során figyelembe kellett venni, hogy a központi egység egy dobozba fog kerülni. Az interfészkártyán elhelyezkedő másik három kártya már meghatározott egy összmagasságot, ezt nem szerettem volna még azzal is növelni, hogy az interfészkártyát nagyon el kelljen emelni a doboz aljától. Ehhez arra volt szükség, hogy a NYÁK alsó oldalán ne legyenek magas alkatrészek. Először elhelyeztem a három másik kártya csatlakozóját, körvonalát és rögzítőfuratait a PCB-n, ez nagyjából meghatározta a kártya hosszabbik oldalának méretét. Az egyik hosszabbik oldalra elhelyeztem a 90°-os nyomógombokat és LED-eket, ez lett a doboz előlapi oldala, itt kapott helyet az USB csatlakozó és az antennakivezetések is. Ezért az ezzel ellentétes oldalon alakítottam ki a tápáramköröket, hogy a doboz hátlapján lehessen az AC betáplálás. A 3-pólusú sorkapocs, az olvadóbiztosító, a varisztor és az AC/DC tápegységmodul bemeneti két lába tartozik a hálózati oldalhoz, ezen alkatrészek között több elrendezést is kipróbáltam, melyek közül a 7.3. ábrán látható PCB részlet szerinti elrendezés bizonyult a legoptimálisabbnak. Ebben az elrendezésben a varisztor lábainál mérhető a legkisebb távolság két vezető között, amely valamivel több, mint 2 mm. Ez eleget tesz annak az általánosan elfogadott szabálynak, hogy 100 V-onként körülbelül 1 mm szigetelési távolságot ajánlott tartani. A Saturn PCB Design program Conductor Spacing kalkulátora 171-250 V-os vezetők közti feszültségkülönbség mellett, külső rétegen futó bevonat nélküli vezetőre 1.25 mm minimális távolságot ír elő. A PCB-n lévő vezetőkeken ugyan van bevonat a forrasztásgátló

lakk miatt, viszont az alkatrészek lábainál ez megszűnik, ezért számoltam a bevonat nélküli esettel. Bevonattal számolva ez az érték drasztikusan lecsökken. A NYÁK-on betartott 2 mm-es minimum távolság tehát eleget tesz ennek az 1.25 mm-es szabálynak.



**7.3. ábra.** AC betáplálás a PCB-n

Az AC/DC tápegység kimenetén létrejövő 5 V-os egyenfeszültség, valamint az USB csatlakozóról érkező tápfeszültség tovább transzformálása a kapcsolási rajznál bemutatott kapcsolóüzemű tápegységgel történt. A bemeneti kondenzátorokat igyekeztem közel elhelyezni az IC lábához, amelyet a kondenzátorok padjeivel együtt egy nagy kiterjedésű rézfelület vesz körbe. A kondenzátorok másik padjét több viával kötöttem a belső földkiöntéshez az alacsony impedanciás kapcsolat megvalósítása érdekében. A tápegység IC tokjának alsó oldalán van egy exposed pad, amit össze kell kötni a földdel. Annak érdekében, hogy ez az IC is beültethető legyen kézzel, egy nagyobb rézfelülettel vettem körül ezt a lábat, amelyen a forrasztásgátló lakk rétegen is nyitottam egy ablakot. Ennek segítségével az IC mellett szabad rézfelületek vannak, amelyen keresztül forrasztás során hőt lehet közölni az IC hasán lévő láb megfelelő forradásához. A mindkét irányban túlnyúló fémezés akkor is segítség lehet, ha valami miatt ki kell cserélni az IC-t, mert így két forrasztópákával egyszerre lehet melegíteni a felületet. A tápegység kimenetén lévő tekercset is vastag rézkiöntéssel kötöttem az IC lábához, mivel ezen a vezetéken keresztül folyik a terhelőáram.

## 8. fejezet

# Élesztés, tesztelés

Az interfészártya élesztése során a tápáramkörök helyes működéséről kellett meggyőződnöm, hiszen más funkcionalitást önmagában nem lát el, csak a többi kártyával együtt. Az AC/DC tápegység tesztelése nagy odafigyelést igényelt, hiszen a hálózati feszültség érintése veszélyes lehet. Az interfészártyát tartalmazó központi egységet csak zárt és földelt doboz esetében szabad a hálózatra csatlakoztatni, viszont akkor nem lehet multiméterrel megmérni a tápegységmodul kimenetén létrejövő feszültséget. Ezt az élesztés során azonban egyszer el kellett végezni, mielőtt az áramkör többi részére kapcsoltam a tápegység kimenetét. Miután ez megtörtént, összeforrasztottam a tápegység kimenetén lévő, az áramkör megszakíthatóságát szolgáló két kis fém felületet. A következő fokozatot képző kapcsolóüzemű tápegység teszteléséhez már nem volt szükség a hálózati feszültségre, mivel az USB 5 V-ról is képes működni. Azonban első bekapcsoláshoz egy kis áramkorlátra (néhány 10 mA) beállított labortápegységet használtam. Ha hibás lenne a kapcsolás, akkor ezzel megakadályozható lenne, hogy túl sok áramot vegyen fel a tápegység és esetlegesen tönkre is menjen. Mivel ennél a tápegységnél is megjelent a tervezett 3.8 V-os kimeneti feszültség, így ennek a kimenetén lévő megszakító komponenst is összekötöttem. Fejlesztés közben egyébként is hasznos, ha labortápegységről tápláljuk a rendszert, hiszen ekkor nyomon tudjuk követni az áramfelvételt.

A GSM kártyán nincs további tápegység, A GSM modul közvetlenül az interfészártyán előállított 3.8 V-ról üzemel, saját maga állítja elő az 1.8 V-os IO feszültséget. A GSM modult úgy teszteltem a processzoros kártya nélkül, hogy labortápegységről kapcsoltam rá a 3.8 V-ot, illetve a 3.3 V-ot a szintillesztő IC processzor oldali tápjának. A GSM modul soros kommunikációs vonalát pedig egy USB-TTL átalakító segítségével a PC-hez kötöttem. A PC felől nézett TX vonalra egy soros ellenállást forrasztottam, mivel az átalakító 5 V-os jelet ad ki, a GSM modul előtti szintillesztés pedig 3.3 V-os jelet vár. A másik irányba nem volt probléma ez a különbség, mivel a 3.3 V-os rendszer magas jelszintjét az 5 V-os rendszer is magasnak érzékeli. A GSM modul működőképességét egy terminál programból kiküldött AT parancsra adott válasz igazolta. Természetesen ehhez az engedélyező lábat hardveresen magas szintre kellett kötni.

A wM-Bus kártyán van egy lokális fix kimenetű LDO lineáris regulátor, amely a 3.8 V-ból vagy az elemfeszültségből állítja elő a wM-Bus modul számára a 3.3 V-os tápfeszültséget.

Ezzel a fogyasztással már nem lehetett terhelni a processzoros kártya processzora által előállított 3.3 V-ot. Azért, hogy a processzor és a wM-Bus modul közötti jelek megszakíthatóak legyenek, ide is bekerült a GSM kártyán bemutatott szintillesztő IC, ami itt tényleges szintillesztést nem végez, hiszen mindkét oldalán 3.3 V-os jelek vannak, viszont engedélyezhető a kimenete. A tápfeszültség ellenőrzése után a rádiós modul működésének ellenőrzése következett a GSM modulnál leírt módszerrel, csak ezen a kártyán még szerepelt a jelútban a mikrokontroller is. Ez a modul is reagált a neki soros vonalon küldött AT parancsra. A firmware-fejlesztés közben jött elő egy hardveres tervezési hiba, ami miatt a mikrokontrollerben található RTC (Real-Time Clock) nem kapott tápfeszültséget. Ezt a hibát kis módosítással meg lehetett szüntetni, későbbi újragyártás esetén mindenképpen ki kell javítani.

Az előbbiekben bemutatott három kártya élesztése körülbelül egy időben történt, viszont ekkor még a processzoros kártya nem állt rendelkezésre. Ezért a szoftverek fejlesztése egy munkatársam által a processzoros kártya nélkül történt. A wM-Bus kártyán lévő mikrokontroller firmware-ének fejlesztéséhez egyáltalán nem volt szüksége a processzoros kártyára, csak a fejlesztés végén a rendszer integrálásánál kellett kiegészítenie olyan részekkel, amelyek lehetővé teszik az adatkoncentrátor által összegyűjtött adatok továbbadását, valamint a fő processzortól érkező parancsok fogadását, feldolgozását. A wM-Bus hálózat felépítésének, működésének fejlesztéséhez csak néhány wM-Bus kártyára volt szükség, melyek közül az egyik az adatkoncentrátor, a többi pedig a mérőóra node szerepét töltötte be. A GSM kártyán nem található mikrokontroller, ezért a GSM modul vezérléséhez mindenképpen szükség volt valamilyen processzorra. A processzoros kártya hiányában ez a fejlesztés PC-s Linux környezetben történt, mivel a tervek szerint a processzoros kártyán is beágyazott Linux operációs rendszer végzi a kommunikációs folyamatok menedzselését. Ehhez a PC-hez később a GSM kártya mellé csatlakoztattuk a wM-Bus hálózat adatkoncentrátorát is, amely így már a teljes rendszer funkcionális tesztelését tette lehetővé.

A processzoros kártya élesztése és tesztelése összetettebb feladat volt. A kis lábtávolságú SMD csatlakozó miatt nem volt lehetőség labortápegységről való tápláláshoz vezetékek ráforrasztására, ezért egyből az interfész kártya biztosította a tápellátást a kártya számára. Annak érdekében, hogy a processzor PMU-jának működését ellenőrizni tudjam, szükség volt egy olyan microSD kártyára, amelyről tud bootolni a processzor. Ehhez fordítani kellett egy olyan minimális funkcionalitást biztosító image fájlt, amelyben legalább a PMU kezelése implementálva van. Az image fájl SD kártyára való kiírása után behelyeztem az kártyát a foglalatba. A processzor bekapcsolásához, így a PMU indulásához is szükség volt a bekapcsoló gomb megnyomására. Ezután multiméterrel meg tudtam mérni a processzor belső tápegységének kimeneteit a külső kondenzátorok lábain. A 3.3 V és az 1.5 V-os core feszültség pontosan kimérhető volt, sajnos az 1.8 V-os kimenet kondenzátorai a PCB alján helyezkednek el, így azokhoz nem fértem hozzá. Ellenőriztem továbbá, hogy az interfész kártyán keresztül eljut a 3.3 V a kommunikációs kártyák csatlakozóihoz.

## 9. fejezet

# Összefoglalás

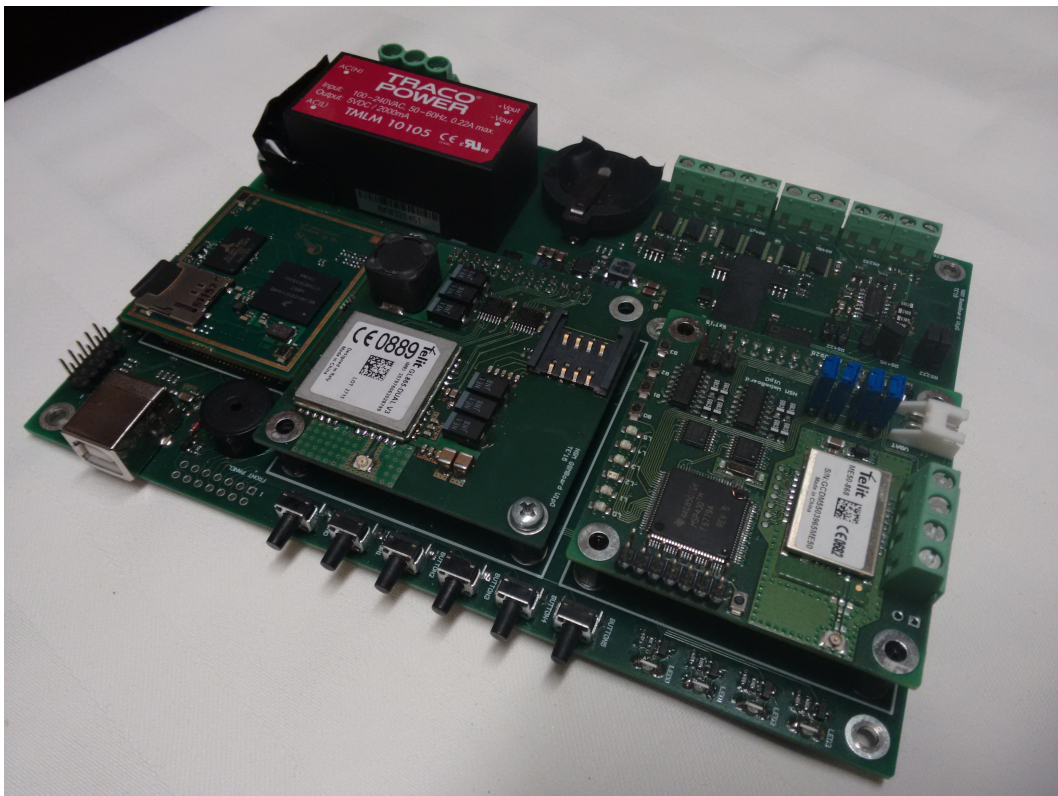
A dolgozatomban egy vezeték nélküli okos fogyasztásmérő-óra hálózathoz terveztem hardver egységeket. Egy ilyen sok mérőórából álló rendszer kiépítése több előnnyel is jár a hagyományos mérőórákhoz képest. Alapvetően a távoli leolvashatóság lehetősége miatt alkalmaznak az USA-ban és több európai országban is smart meter rendszereket. A rendszer egyik feladata az egyes mérőórák által alkotott vezeték nélküli, kisebb hatótávolságú kommunikációs hálózat felépítése és irányítása, másik feladata pedig a GSM hálózaton történő kommunikáció a szolgáltatót szimbolizáló távoli szerver felé.

Az első fejezetben kiválasztottam néhány kommunikációs protokollt, amelyek megoldást nyújthattak volna a problémára, és bemutattam, hogy ezek megvalósításához milyen hardveres elemek integrálására lett volna szükség. Mérlegeltem a kommunikációs protokollok előnyeit és hátrányait, ezek alapján választottam ki a wM-Bus szabvány szerinti kommunikációt, amelyet kifejezetten okos mérőórák összekapcsolására fejlesztettek ki. A második fejezetben elkészítettem egy rendszertervet, amelyben magas szinten specifikáltam a két fő egységet, a kommunikációs egységet és a gatewayt. Ezután a megvalósítandó konkrét funkciók alapján olyan részegységekre bontottam a rendszert, amelyeket külön áramkörü lapon terveztem kivitelezni. Az ezt követő fejezetekben a négy hardver tervezésének részletes bemutatása következett. Nagyvonalakban a tervezési folyamat minden kártyánál azonos lépésekből állt. A két kommunikációs kártya (wM-Bus, GSM) és az interfész kártya tervezése hasonló bonyolultságú feladat volt, amely az alkatrészek kiválasztásából, a kapcsolás megtervezéséből és a nyomtatott áramkör megtervezéséből állt. A processzoros kártya tervezése volt a legtöbb időt igénylő feladat, mivel ez követelte meg a legbonyolultabb gyártási technológiákat. Ebből kifolyólag elég nehéz feladat volt ennek a kártyának a legyárttatása. Már a tervezés első lépésében ki kellett választani a PCB gyártó céget és egyeztetni a kívánt paraméterek elérhetőségét. A 6-rétegű PCB-k gyártása már eleve költséges, ezért több alkatrész-beültető cég ajánlatából kellett a legkedvezőbb árút kiválasztani. A kész tervet az beültető cég által kért módosításokkal kellett kijavítanom, kiegészítenem.

Először a wM-Bus modullal ellátott kommunikációs kártyát terveztem meg és gyártattam le néhány példányban, hogy azon a hálózat szoftveres fejlesztése elkezdődhessen. Egy munkatársam által ez sikeresen meg is történt. Később elkészült a GSM és az interfész kártya hardvere is. A GSM kártya PC-ről vezérelve megfelelően működött. Ezek után

következett a komplett rendszer tesztelése a processzoros kártya helyett PC-s Linux alatt futó szoftverrel, szimulált mérési adatokkal, amely során szintén megfelelő működést mutattak a kártyák. A processzoros kártya gyártási nehézségei miatt nem volt idő a beágyazott Linux kód elkészítésére, de a rendszer enélkül is ellátja fő feladatait. Az elkészült központi egységről látható egy fénykép a 9.1. ábrán, amely mind a négy kártyát tartalmazza.

További fejlesztések során elképzelhető lenne a GSM kapcsolat kétirányú kihasználása, amely a távolról való beavatkozást tenné lehetővé. Ez önmagában hardveres módosítást nem igényel, teszteléséhez lehet kis kiegészítő hardvereket készíteni, amelyek szemléltetik például a távolról történő be- és kikapcsolást.



9.1. ábra. Az elkészült hardverek

# Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a ProDSP Technologies Kft.-nek, hogy lehetőséget nyújtottak a diplomatervem elkészítéséhez. Köszönöm konzulenseimnek, Molnár Károlynak és Orosz Györgynek, hogy konzultációs lehetőségekkel segítették munkámat. Külön köszönet Bogár Istvánnak, Szalma Tamásnak és Vadász Istvánnak, hogy a tervezés során felmerülő kérdéseimmel, problémáimmal bármikor fordulhattam hozzájuk.

# Ábrák jegyzéke

1.1.	AMB8626 típusú rádiós modul . . . . .	9
1.2.	Lehetséges ZigBee hálózati topológiák . . . . .	10
1.3.	Egy lehetséges DASH7 hálózati elrendezés . . . . .	14
2.1.	A magas szintű rendszerterv . . . . .	19
3.1.	A központi egység blokkvázlata . . . . .	22
4.1.	A wM-Bus modul és környezete . . . . .	25
4.2.	RS232 interfész . . . . .	26
4.3.	ME50-868 rádiós modul . . . . .	27
4.4.	A mikrokontroller és környezete . . . . .	28
4.5.	A kártya tápellátása . . . . .	29
4.6.	Hullámimpedancia kalkuláció antennavezeték tervezéséhez . . . . .	31
4.7.	Antennavezeték kialakítása a NYÁK-on . . . . .	32
5.1.	A GSM modul és környezete . . . . .	33
5.2.	A GSM modul tápfeszültségei . . . . .	34
5.3.	Szintillesztés . . . . .	35
5.4.	Hullámimpedancia kalkuláció antennavezeték tervezéséhez . . . . .	36
6.1.	A processzor EMI perifériája . . . . .	41
6.2.	DDR2 memória bekötése . . . . .	42
6.3.	A processzor PMU-jának blokkvázlata . . . . .	44
6.4.	A processzor PMU-jának használata . . . . .	45
6.5.	A microSD kártya illesztése . . . . .	47
6.6.	BOOT mód választás . . . . .	48
6.7.	Tápvonal huzalozási struktúrák NYÁK lemezen . . . . .	50
6.8.	A kiválasztott rétegszerkezet paraméterei . . . . .	51
6.9.	Impedancia-kalkuláció a DDR2 memória jeleihez . . . . .	52
6.10.	Impedancia-kalkuláció a DDR2 memória differenciális jelpárjaihoz . . . . .	52
6.11.	A DDR2 memória-interfész adat jelcsoportjának huzalozása . . . . .	54
6.12.	A DDR2 memória referencia-feszültségének előállítása . . . . .	55
6.13.	A PMU és környezetének egy része . . . . .	56
6.14.	A processzoros kártya felülnézeti képe a terv alapján . . . . .	57



6.15. A processzoros kártya panelizált terve . . . . .	58
6.16. A processzoros kártya beültetés utáni képe . . . . .	59
7.1. Az AC/DC átalakító használata . . . . .	61
7.2. Kapcsolóüzemű tápegység 3.8 V előállításához . . . . .	62
7.3. AC betáplálás a PCB-n . . . . .	64
9.1. Az elkészült hardverek . . . . .	68

# Irodalomjegyzék

- [1] Telit. *LE50-433 / LE50-868 Product Page*. <http://www.telit.com/sr-rf/le50-433-le50-868/>.
- [2] Amber Wireless. *AMB8626 Product Page*. <https://www.amber-wireless.com/en/products/ism-radio-modules/alle-wireless-module/868-mhz-long-range-radio-module-with-rf-pad-amb8626.html>.
- [3] ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org/>.
- [4] DASH7 Alliance. <http://www.dash7-alliance.org/>.
- [5] DASH7 Alliance. *DASH7 Alliance Protocol Specification v1.0*. <http://www.dash7-alliance.org/specification/>.
- [6] John Peter Norair. Dash7 firmware project. <https://github.com/jpnorair/OpenTag>.
- [7] Indigresso Wiki. *SX1212-DK7A433 development kit*'page. <http://www.indigresso.com/wiki/doku.php?id=opentag:board:dk7a433>.
- [8] www.emcu.it. *Wireless M-BUS Solutions, SPIRIT1 and STM32L*. [http://www.emcu.it/WirelessMBUS/Wireless\\_M-BUS\\_Solutions\\_and\\_more.pdf](http://www.emcu.it/WirelessMBUS/Wireless_M-BUS_Solutions_and_more.pdf).
- [9] Silicon Labs. *An Introduction to Wireless M-Bus*. <http://pages.silabs.com/rs/634-SLU-379/images/introduction-to-wireless-mbus.pdf>.
- [10] Telit. *xE50-433/868 RF Module User Guide*. [http://www.telit.com/fileadmin/user\\_upload/products/Downloads/sr-rf/le70-868/Telit\\_xE50-433\\_868\\_RF\\_Module\\_User\\_Guide\\_r13.pdf](http://www.telit.com/fileadmin/user_upload/products/Downloads/sr-rf/le70-868/Telit_xE50-433_868_RF_Module_User_Guide_r13.pdf).
- [11] Freescale Semiconductor. *i.MX28 Applications Processors for Consumer Products - IMX28CEC*, July 2012. [http://www.nxp.com/files/32bit/doc/data\\_sheet/IMX28CEC.pdf](http://www.nxp.com/files/32bit/doc/data_sheet/IMX28CEC.pdf).
- [12] Freescale Semiconductor. *i.MX28 Reference Schematics*, August 2010.
- [13] Freescale Semiconductor. *Hardware and Layout Design Considerations for DDR2 SDRAM Memory Interfaces - AN2910*, March 2007. [http://www.nxp.com/files/32bit/doc/app\\_note/AN2910.pdf](http://www.nxp.com/files/32bit/doc/app_note/AN2910.pdf).

- [14] Freescale Semiconductor. *Using the i.MX28 Power Management Unit and Battery Charger - AN4199*, April 2015. [http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/app\\_note/AN4199.pdf](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/app_note/AN4199.pdf).
- [15] NXP Semiconductors. *SD(HC)-memory card and MMC interface conditioning - AN10911*, April 2013. [http://www.nxp.com/documents/application\\_note/AN10911.pdf](http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10911.pdf).
- [16] Freescale Semiconductor. *i.MX28 Layout and Design Guidelines - AN4215*, September 2010. [http://www.nxp.com/files/32bit/doc/app\\_note/AN4215.pdf](http://www.nxp.com/files/32bit/doc/app_note/AN4215.pdf).
- [17] Multi-Teknik. Microstrip impedance calculator. <http://www.multek.se/engelska/engineering/pcb-structures-2/microstrip-impedance-calculator-2>.