



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Mongyi Zoltán

AKKUMULÁTORMONITOROZÓ RENDSZER

KONZULENS

Dr. Sujbert László

Gyetzván Péter (Knorr-Bremse)

BUDAPEST, 2021



DIPLOMATERVEZÉSI FELADAT

Mongyi Zoltán (CYCI3Z)
szigorló villamosmérnök hallgató részére

Akkumulátormonitorozó rendszer

A haszongépjármű-iparban is egyre nagyobb teret nyernek a tisztán elektromos rendszerek, melyek energiaellátásához elengedhetetlen a megfelelő kapacitású akkumulátorpakk beépítése a járműbe.

Ezzel párhuzamosan az autonóm haszongépjárművek, illetve az ezekhez szükséges haszongépjármű-alrendszerek fejlesztése is folyamatban van.

Ezen technológiai fejlesztési irányok, jövőbeli műszaki megoldások megkövetelik egy új redundáns energiairányítási rendszer fejlesztését. Ennek részeként került kidolgozásra az akkumulátormonitorozó egység koncepciója, mely a cellafeszültségek és az akkumulátorpakk hőmérsékletének figyelése mellett az egyes cellafeszültségeket igyekszik egyensúlyban tartani.

A hallgató feladatának a következőkre kell kiterjednie:

- Mutassa be a jelenleg elérhető akkumulátorok és akkumulátormonitorozó rendszerek fő tulajdonságait!
- Elemezze részletesen a működési elvüket, részletezze a működés közben detektálható hibákat és a monitorozott paramétereket!
- Készítsen hardver rendszertervet és kapcsolási rajzot a tervezett monitorozó rendszerhez!
- Készítsen szimulációt a működés és a megválasztott paraméterek ellenőrzésére!
- Igazolja mérésekkel a létrehozott akkumulátor monitorozó egység helyes működését!

Tanszéki konzulens: dr. Sujbert László – habilitált docens

Külső konzulens: Gyetván Péter (Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.)

Budapest, 2021.03.14

.....
Dr. Dabóczi Tamás
tanszékvezető
egyetemi tanár, DSc

Tartalomjegyzék

DIPLOMATERVEZÉSI FELADAT	2
Összefoglaló	7
Abstract.....	8
1 Bevezető	9
1.1 Kapcsolatom a Knorr-Bremse-vel	9
1.2 A projekt rövid bemutatása.....	9
1.3 Témaválasztás	10
2 Akkumulátorok és monitorozásuk	11
2.1 Akkumulátorok	11
2.1.1 Ólom-sav akkumulátor	12
2.1.2 Lítium titánium oxid akkumulátor	13
2.2 Akkumulátor paraméterek	14
2.2.1 Cellafeszültség	14
2.2.2 Kapacitás.....	14
2.2.3 Áramerősség, C-ráta	14
2.2.4 Élettartam.....	15
2.2.5 Töltöttségi szint (state-of-charge, SOC)	15
2.2.6 Aktuális kapacitás, SOH State of Health	16
3 Az akkumulátormonitorozó rendszerek fő tulajdonságai és funkciói	17
3.1 Működési elv (Akkumulátorcellák kiegyenlítése)	17
3.1.1 Aktív kiegyenlítés	18
3.1.2 Passzív kiegyenlítés	18
3.2 Topológiák	20
3.2.1 Centralizált topológia.....	20
3.2.2 Moduláris topológia.....	21
3.2.3 Elosztott topológia	22
3.2.4 Decentralizált topológia	23
3.3 Kommunikáció.....	24
3.3.1 Külső kommunikáció	24
3.3.2 Belső kommunikáció	24

3.4 Mért paraméterek	25
3.4.1 Feszültség.....	25
3.4.2 Áram	25
3.4.3 Hőmérséklet	25
3.4.4 Hűtés mértéke, lég vagy folyadék hűtésű akkumulátoroknál	26
3.5 A működés közben detektálható hibák	27
3.5.1 Belső hibák	27
3.5.2 Külső hibák	29
3.6 Számított paraméterek	30
3.6.1 Feszültség: minimum és maximum cella feszültség.....	30
3.6.2 SOC becslés	30
3.6.3 Lemerítés mértéke, DOD Depth of discharge	32
3.6.4 Aktuális kapacitás, SOH State of health	33
3.6.5 Elérhető teljesítmény, SOP State of Power	33
3.6.6 Maximális töltő áram, CCL Charge Current Limit.....	33
3.6.7 Maximum kisütő áram, DCL Discharge Current Limit.....	33
3.6.8 Összesített töltési-kisütési ciklusok száma	33
4 A monitorozó áramkör kiválasztása	34
5 Blokkvázlat elkészítése	36
6 Szimuláció.....	39
6.1 Akkumulátor cella szimuláció meglévő modell módosításával.....	39
6.2 Akkumulátor cella modell helyettesítő kép alapján görbe illesztéssel	43
7 Kapcsolási rajz elkészítése	48
7.1 Főoldal	49
7.2 BQ79616 és a tápellátásához tartozó kiegészítő elemek	50
7.3 Kommunikáció.....	51
7.4 Hőmérséklet érzékelő bemenetek	55
7.5 Akkumulátorhoz kapcsolódó szűrők és kiegyenlítő ellenállások	56
7.6 Beültetési variánsok kezelése	57
8 Nyomtatott áramköri rajz elkészítése	58
8.1 A tápellátás kialakítása	59
8.2 Kommunikációhoz tartozó alkatrészek elhelyezése	60
8.3 Hőmérsékletméréshez tartozó alkatrészek	61

8.4 Az akkumulátor kiegyenlítéshez és feszültség méréshez tartozó elemek elrendezése	62
9 Mérések.....	63
9.1 Első kipróbálás.....	63
9.2 A DaisyChain kommunikáció tesztelése	64
9.3 Cellafeszültség mérés tesztelése	64
9.4 Cella kiegyenlítés tesztelése	65
9.5 Hőmérséklet mérés tesztelése	66
10 Összefoglalás és kitekintés.....	69
11 Köszönetnyilvánítás.....	71
12 Irodalomjegyzék.....	72
13 Függelék.....	74
13.1 Az akkumulátor monitorozó egység kapcsolási rajza.....	74
13.2 A megtervezett nyomtatott áramkör felső és alsó oldala	79
13.3 Az akkumulátor monitorozó egység 3D modellje	80

HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző, 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 hitelesített 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.

Kelt: Budapest, 2021. 12. 17.

.....
Mongyi Zoltán

Összefoglaló

A haszongépjárművekben is egyre nagyobb teret nyernek a nagyfeszültségű akkumulátorról üzemelő elektromos kamionok és a különböző szintű vezetéstámogató asszisztens funkciók és lépésről lépésre bevezetésre kerülnek az egyre nagyobb fokú önvezetési szintek. Mindkét esetben szükség van tápellátás redundanciájára a kritikus járműirányítási funkciók működtetéséhez, ha az elsődleges akkumulátor nem működne. Ilyen biztonságkritikus funkció a kormányrendszer működtetése és a fékrendszer működtetése.

Erre nyújt megoldást egy beépített biztonsági akkumulátor, ami egy kapcsoló segítségével akkor csatlakozik a jármű tápvonalára, amikor arra szükség van. Annak érdekében, hogy ez az akkumulátor kis helyen elférjen és nagy áramokat lehessen kinyerni belőle, a koncepció egy lítium-titánium oxid akkumulátort tartalmaz.

A lítium-titánium oxid cellák felügyelete és kiegyenlítése szükséges, hogy ne alakulhasson ki bennük sem túl alacsony sem túl magas feszültség. A kiegyenlítés pedig javítja a cellák kihasználtsági szintjét tehát a kivehető energiát, ezáltal megnövekedett üzemidőt biztosít.

Dolgozatomban amellet, hogy szót ejtek az akkumulátorok tulajdonságairól, ismertetem az autóiparban használt ólomsavas és a projektben használt lítium-titánium oxid cellák előnyeit és hátrányait.

A kitűzött feladat végrehajtása során megvalósítottam az akkumulátormonitorozó rendszer blokkvázlatát, szimulációk során kiválasztott alkatrészértékekkel építettem fel a kapcsolási rajzot, és megterveztem a rendszerhez tartozó nyomtatott áramkört.

Abstract

In the commercial vehicle sector electric trucks powered by high-voltage batteries are gaining place. In addition, various levels of driver assistance functions and self-driving function are being implemented in trucks step by step.

In both cases, power redundancy is needed to operate critical vehicle control functions in case the primary battery fails. Such safety-critical functions include steering system operation and brake system operation.

This is provided by a built-in safety battery, which is connected to the vehicle's power line via a switch when it is needed. To allow this battery to fit into a small space and draw high currents, the concept incorporates a lithium-titanium oxide battery.

The lithium-titanium oxide cells need to be monitored and balanced to ensure that they do not enter either into under voltage or into over voltage range

Balancing improves the utilization level of the cells, thus more energy can be extracted, which increases the operating time.

In my thesis next to discussing the properties of batteries, I will also describe the advantages and disadvantages of lead-acid cells used in the automotive industry and the lithium-titanium oxide cells used in this project.

In carrying out the set task, I implemented the block diagram of the battery monitoring system, built the circuit diagram using component values, which were selected according to simulation results, and designed the printed circuit board for the system.

1 Bevezető

1.1 Kapcsolatom a Knorr-Bremse-vel

A Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. a piacvezető Knorr-Bremse konszern haszongépjármű üzletágának magyarországi leányvállalata. A budapesti telephely kutató-fejlesztő központként kizárólag a termékek fejlesztésével foglalkozik, míg a kecskeméti telephelyen gyártás és fejlesztés is található.

A céggel 2016-ban kerültem kapcsolatba, a budapesti elektronikus hardverfejlesztő csoportba jelentkeztem. Kezdetben gyakornokként dolgoztam, illetve a mesterképzéshez tartozó szakmai gyakorlatomat is a cégnél végeztem el. Egy év gyakorlat után felvételt nyertem egy megnyitott pozícióba, így 2017 óta hardverfejlesztő mérnökként dolgozom, hogy innovatív és megbízható megoldásokat alkossunk.

1.2 A projekt rövid bemutatása

A haszongépjárműiparban is várható az elektromos járművek terjedése, ezért a belső égésű motorú járművekhez kapcsolódó rendszerek fejlesztése mellett a cég figyelmet fordít az elektromos járművek kiszolgálásához szükséges termékek fejlesztésére is. Mindezt természetesen úgy, hogy a rendszereknek továbbra is meg kell felelniük az ebben az iparágban jellemző biztonságkritikus követelményeknek.

Az egyik legnagyobb változás az energiatárolás technológiájában van, hiszen a jövőben nem üzemanyagot visznek magukkal a járművek, hanem nagyfeszültségű akkumulátor pakkot. A nagyfeszültségű akkumulátor pakk mellett azonban több funkciónak kisfeszültségről kell működnie, a biztonságkritikus funkcióknak (jelenleg ilyenek például a kormányozás, a fékezés, az autonóm funkciók) pedig redundáns tápellátásra is szükségük lesz. Az elektromos tápellátás redundanciájának másik hajtóereje az autonóm funkciók fejlődése, hiszen az önvezetés 3-as szintjétől a jármű irányít bizonyos biztonságkritikus funkciókat.

Ezekre az igényekre fejlesztünk jelenleg egy megoldást, ami egy 26V-os biztonsági akkumulátort tartalmazó rendszer. Egy beépített kapcsoló tudja az akkumulátort igény esetén rákapcsolni a jármű vagy a jármű egyes alrendszerének tápvonalára, így biztosítva a tápellátást, akkor is, ha a normál üzemi akkumulátor meghibásodik.

1.3 Témaválasztás

Fontos volt számomra, hogy a diplomamunkám jól körülhatárolható legyen, és olyan témán dolgozhassak, ami közel áll hozzám, és kamatoztatni tudom a villamosmérnöki ismereteimet és tapasztalataimat.

A redundáns energia menedzsment rendszer egyik részének, az akkumulátort monitorozó egységnek a megtervezését választottam a diplomamunkám témájául. Ez az úgynevezett akkumulátormonitorozó rendszer, angol terminológia szerint battery management system (ezért a továbbiakban a BMS rövidítést is használom). Az akkumulátorpakk 11 darab 2.4V-os névleges feszültségű lítium-titán-oxid (LTO) cellából áll össze, így adódik a névleges 26.4V-os feszültség szint. Amikor az akkumulátorpakkot több lítium alapú cella soros kapcsolásával valósítjuk meg, nagyon fontos, hogy kellő figyelmet fordítsunk olyan elektronikus funkciók beépítésére, amelyek időről időre kiegyenlítik a cellák között kialakuló különbségeket.

A különbségek azért alakulnak ki, mert bármennyire is igyekszünk hasonló cellákat választani, egy adott akkumulátorhoz, a cellák nem lesznek tökéletesen egyformák. Legtöbbször lesz egy kis különbség a töltöttségi szintjük, a hőmérsékletük, a kapacitásuk, a belső impedanciájuk, az önkisülési sebességük vagy a termikus viselkedésük között. Ez vezet ahhoz, hogy a cellák nem teljesen egyformán merülnek le vagy töltődnek fel és ha ezt nem kezeljük az komoly problémákat okozhat töltés és kisülés esetén is. A cellákat nem szabad túltölteni, ezért, ha egy cella eléri a maximális töltöttséget akkor meg kell állítani a töltést. Így a többi cella nem éri el a maximális töltöttséget, vagyis nem használjuk ki az akkumulátor teljes kapacitását, minél nagyobbak a különbségek annál kevésbé használhatjuk ki a teljes kapacitást. A cellákat túlságosan lemeríteni sem szabad, ezért amikor az első cella eléri a minimális feszültséget, onnantól kezdve nem vehetünk ki több töltést az akkumulátorból.

Tehát a BMS fő feladatai az akkumulátorcellák feszültségének mérése, valamint a cellák közötti feszültségkülönbségek kiegyenlítése. A továbbiakban ismertetem az akkumulátorok fajtáit, ezek fő paramétereit, majd az akkumulátormonitorozó rendszerek működését és főbb tulajdonságait. Ezután a BMS tervezési lépésein megyek végig, bemutatom a blokkvázlatot, a kapcsolási rajz elkészítését, és a nyomtatott áramkör megtervezését. Dolgozatomban a részegységek helyes működését szimulációval ellenőrzöm.

2 Akkumulátorok és monitorozásuk

2.1 Akkumulátorok

A legtöbb mai jármű rendelkezik akkumulátorral. Nélkülözhetetlen fontosságú, hiszen indításkor ez hajtja meg az indítómotort, enélkül a jármű motorja nem tudna beindulni. Továbbá menet közben ez szolgáltatja a gyújtást és a ma már rengeteg elektromos fogyasztó tápellátását. Az első akkumulátor Alessandro Volta olasz fizikus nevéhez fűződik, aki 1800-ban réz és cink korongokat tett egymásra és sós vizes oldatba mártott ruhaanyagot tett közéjük. Egy ilyen cella 0.76V feszültséget állít elő. Ezen feszültség szintet a cellák sorba kapcsolásával lehet növelni. Az akkumulátor két kivezetését elektródáknak nevezzük, a pozitív töltésű a katód, a negatív pedig az anód. Az elektródák közt található folyadék vagy gélyszerű anyag az elektrolit, ami elektromos töltéssel rendelkező részecskéket, ionokat tartalmaz. Az anódot és a katódot egy szeparátor választja el egymástól, amely így meggátolja az elektródák belső zárlatát, de átengedi az ionokat a két elválasztott térrész között. Az akkumulátorban tárolt kémiai energia kisülés közben belső kémiai folyamatoknak köszönhetően (oxidáció és redukció) átalakul elektromos energiává. Az anód redukáló anyag, mert elektronokat veszít, a katód pedig oxidáló anyag, mert elektronokat vesz fel. Az anódtól a katód felé pozitív ionok mozognak, az anódon pedig szabad elektronok halmozódnak fel. Ez a folyamat a különböző kémiai összetételek szerint lehet megfordítható, illetve irreverzibilis. Ha a folyamat nem megfordítható akkor az akkumulátort vagy másnéven elemet lemerülése után nem lehet tovább használni. A továbbiakban a tölthető akkumulátorokkal foglalkozom. Töltés közben a folyamat a külső elektromos tér hatására megfordul és visszaáll a kiindulási állapot. [1]

A ma elérhető akkumulátorok különböző tulajdonságaik alapján, mint például méret, feszültség, töltő- illetve kisütő áram és kapacitás nagyon széles skálán mozognak, az egészen apró órába való akkumulátoroktól a több megawatt teljesítményűekig, amik a szél vagy naperőművek által előállított energiát képesek magukban tárolni. Dolgozatom során a járműiparban használatos akkumulátorokról írok bővebben, ezek közül is azokkal fogok foglalkozni, amelyek a haszongépjárművekben ma használatban vannak.

A mai haszongépjárművekben elsősorban 24V-os vagy 12V-os akkumulátorok találhatóak. A 24V-os rendszerek a legelterjedtebbek, de a 12V-os rendszereknek is nagy

piaca van, leginkább Észak-Amerikában használják ezeket a járműveket. Mivel a tervezett rendszer a 24V-os rendszerekhez készül, ezért a dolgozatomban is 24V-os akkumulátorokkal foglalkozom, a 12V-os rendszerekkel nem.

2.1.1 Ólom-sav akkumulátor

Először 1854-ben Wilhelm Josef Sinsteden, német gyógyszerész és fizikus, számolt be arról, hogy híg kénsavba merített ólomelektrodák képesek töltést tárolni és felhalmozni. Azonban az első ólomsav akkumulátort 5 évvel később Gaston Raimond Planté fejlesztette ki, az általa létrehozott konstrukciót használjuk jelenleg is. A mai napig ez a legelterjedtebb akkumulátor fajta a járművekben.

Egy ólomsav cella feszültsége 2.1 V, ebből 3, 6, illetve 12 cella sorba kapcsolásával gyártanak 6V-os, 12V-os, vagy 24V-os akkumulátorokat.

Mai szemmel nézve nem feltétlenül a leghatékonyabb energia tárolási forma, de sikeressége nem véletlen. Az ólomsav akkumulátor olcsó, ha a költség és teljesítmény arányt vesszük figyelembe és emellett megbízható is. Hátránya, hogy az akkumulátorban tárolható energiasűrűség jellemzően 30-50 Wh/kg tömegre vetítve, és térfogatra elosztott energiasűrűsége sem kiemelkedő. Hátránya még az is, hogy ólmot tartalmaz, ami környezetszennyező anyag.

Az ólomsav akkumulátort könnyű biztonságosan tölteni, persze oda kell figyelni a megfelelő feszültség tartomány beállítására, illetve a töltés közbeni gázfejlődésre, de ettől eltekintve kevésbé árt neki a túltöltés. A feltöltése úgynevezett CC-CV profil szerint történik, először konstans árammal töltjük, eközben feszültsége növekszik, amíg el nem éri a kívánt feszültség szintet, majd konstans feszültség mellett egyre kevesebb áramot fesz fel, a töltő áram egy előre beállított limit alá csökken akkor tekinthető az akkumulátor teljesen feltöltöttnek. Ez a folyamat lassabb a lítium-ion akkumulátorokhoz képest, 0,1 – 0,05 C lehet a maximális töltő áram, a töltés így nagyjából 12-14 órát vesz igénybe.

A karbantartása a lítium-ion akkumulátorokhoz képest több odafigyelést igényel, a normál savas akkumulátorokban például időről időre újra kell tölteni az ion-cserélt vizet. Ez azért is fontos, hogy mindig fel legyen töltve, mert az oxigénnel való érintkezés káros az elektródákra nézve. Ezt a hátrányt zselés akkumulátorok bevezetésével küszöbölték ki. További előnye az autóiparban, hogy nagyon jól működnek hideg körülmények között, fagypont alatt is le tudják adni teljesítményük jelentős részét.

Melegben ellenben rövidül az élettartamuk. Az élettartam végén annak ellenére, hogy környezetszennyező anyagokból készül, kiválóan újra lehet hasznosítani. [2]

2.1.2 Lítium titánium oxid akkumulátor

A projektben elsődlegesen használt akkumulátor pakk 11 darab lítium titánium oxid cellából épül fel, melyek névleges feszültsége 2,4 V, így az akkumulátorpakk névleges feszültsége összesen 26,4 V-ra adódik.

A lítium-titánium-oxid cellák fajlagos energiája 70-80 Wh/kg, ez nagyjából kétszerese az ólomsav akkumulátor fajlagos energiájának [3]. Ebből következik, hogy azonos energia tárolásához, fele akkora tömegű akkumulátor is, elég. Ha csak a 26 V-os rendszert nézzük ez a súly nyereség még elhanyagolható a jármű tömegéhez képest, azonban, ha például egy teljesen elektromos kamiont tervezünk akkor a nagyfeszültségű akkumulátorpakk, ami a jármű teljes tápellátásáért felel már nem mindegy, hogy mekkora tömegű.

A lítium-titánium oxid cellák másik nagy előnye, amiért nagyon jól lehet őket elektromos járművekben használni, mert gyorsan tölthetőek, akár 5 C rátával is. Ez az érték az ólomsav akkumulátornál 0,1 – 0,05 C más lítium celláknál pedig 1 C. Tehát az LTO cellák jól kombinálhatóak egy fékezési energiavisszanyerő rendszerrel, és ha meg kell állni tölteni, akkor is gyorsan feltölthetőek. Nem csak a töltési, hanem a kisütési rátájuk is magas, akár 10 C is lehetséges, ez azt jelenti, hogy a teljes akkumulátor nagyon nagy áram leadására is képes. Ez az LTO cellák felépítésének köszönhető. A lítium-ion akkumulátorokkal szemben az anód nem grafitból, hanem lítium-titánium-oxidból készül. Az LTO anód felülete grammonként 100 m²/g míg a grafité 3 m²/g, a 30-szor nagyobb felületen keresztül az elektronok könnyebben tudnak közlekedni, lehetővé téve a gyors töltést, és amikor szükséges, akkor nagyáramú kisütést. További előnye, hogy az élettartama rendkívül hosszú, akár 7000 töltési ciklus is lehet.

A haszongépjárművek biztonságos üzemelése is fontos, és ebből a szempontból is jó választás az LTO akkumulátor, ez az egyik legbiztonságosabb lítium alapú akkumulátor. Valamint a hidegben is jól működik.

Hátránya, hogy a kapacitása, habár jobb, mint az ólomsav akkumulátoré, így is lemarad a többi lítium alapú akkumulátortól, melyekkel akár 200 - 260 Wh/kg fajlagos energia is elérhető. Másik nagy hátránya az, hogy drága.

2.2 Akkumulátor paraméterek

2.2.1 Cellafeszültség

Az akkumulátorcella pillanatnyi feszültsége függ a cella kémiai összetételétől, hőmérsékletétől, feszültségétől, áramától. Azonban a biztonságos tartományon való működést biztosítani kell, ezért a feszültség nem mehet a meghatározott maximális feszültség fölé (teljesen feltöltött állapot), illetve a minimális feszültség (teljesen kisütött állapot) alá.

Az akkumulátorcella névleges feszültsége azonban az adott technológiából adódó alapvető tulajdonság, amit az akkumulátorban lejátszódó kémiai folyamatok határoznak meg. Ez úgymond kvantálja azt, hogy egy adott akkumulátor pakk milyen névleges feszültség értékeket vehet fel, attól függően, hogy hány darab cellát kapcsolunk egymással sorba.

2.2.2 Kapacitás

A kapacitás megadja egy cellában, illetve akkumulátorban tárolható töltés mennyiségét. A töltésmennyiség SI-ből származtatott mértékegysége a coulomb [C], amit úgy definiálunk, hogy 1 coulomb az a töltésmennyiség, ami 1 A áramerősség mellett 1 másodperc alatt átfolyik az adott keresztmetszeten, tehát $1\text{ C} = 1\text{ A} \times 1\text{ s}$.

Az akkumulátorok kapacitását leggyakrabban mégsem coulombban, hanem amperórában [Ah] adják meg, $1\text{ Ah} = 3600\text{ As} = 3600\text{ C}$. Ennek praktikus okai vannak, hiszen így könnyebben egy alkalmazáshoz akkumulátort választani, ha a felhasználó tudja, hogy mennyi ideig és mekkora áramot szeretne kivenni egy akkumulátorból.

2.2.3 Áramerősség, C-ráta

Az akkumulátor kapacitásának függvényében megadja, hogy milyen gyorsan, mekkora árammal lehet az akkumulátort tölteni, illetve kisütni.

Például az ólomsav akkumulátorok töltő árama $0.1 - 0.05\text{ C}$, ami azt jelenti, hogy egy 30 Ah -s akkumulátort $0,1\text{ C}$ töltőáram esetén 3 A nagyságú árammal tölthetjük. Az akkumulátor töltése tehát legalább 10 órát igényel, de ennél mindenképp több kell a teljes feltöltéshez, hiszen a töltőáram a töltés végéhez közeledve egyre jobban csökken, illetve a veszteségek miatt némi energia disszipálódik.

Ugyanez az érték LTO cellák esetében 5C, ami egy 10Ah-s cella esetében azt jelenti, hogy a töltőáram akár az 50A-t is elérheti.

Kisütésnél is figyelembe kell venni azt, hogy a cellákon folyó áram ne haladja meg a megengedett maximumot. Az akkumulátor gyors kisütése nagy teljesítményt biztosít, de hosszú távon rövidíti a cellák élettartamát. Ha az applikáció által igényelt áram nagyobb annál, mint amit egy cella szolgáltatni képes, akkor a cellák párhuzamos kapcsolásával lehet növelni az akkumulátor pakk kimeneti áramát. Annyi cellát kell egymással párhuzamosan kapcsolni, hogy az akkumulátor minden körülmény között biztosítani tudja az fogyasztók által igényelt maximális kimeneti áramot, ami felléphet működés közben.

2.2.4 Élettartam

Az akkumulátorok a használat során, különböző mértékben, de veszítenek a kezdeti kapacitásukból és teljesítményükből. Ez arra vezethető vissza, hogy a gyártás során kialakított belső szerkezetük a kisütési-töltési ciklusok során degradálódik a belső hőingadozások miatt.

A gyártók az élettartamot ciklusszámban adják meg, ami azt jelenti, hogy hány kisütési ciklust bír ki egy cella, amíg a kapacitása a névleges kapacitáshoz képest egy bizonyos szint alá nem csökken. Például egy LTO cella élettartama 6000 ciklus 90%-os kapacitásig.

2.2.5 Töltöttségi szint (state-of-charge, SOC)

Fontos, hogy minél pontosabban meg tudjuk becsülni az akkumulátor töltöttségi szintjét, tehát, hogy mennyi energia van még benne, ezáltal előre jelezhető legyen, hogy mennyi ideig áll rendelkezésre az akkumulátor az adott energiafogyasztás mellett. Azt is biztosítani kell, hogy a jármű minden körülmények között biztonságosan megállítható, irányítható maradjon, az ehhez szükséges biztonsági szint alá, nem merülhet le az akkumulátor.

A lítium-ion akkumulátor cellák használata egyre nagyobb teret nyer. Használják elektromos és hibrid járművekben energiátárolásra, megújuló energiaforrások által termelt energia tárolására, hogy később lehessen felhasználni, villamos energia elosztó hálózatokon csúcs simításra és a hálózat stabilitásának javítására. Fontos, hogy meg tudjuk mondani az akkumulátor töltöttségi szintjét, erre az SOC értéket használjuk. Az

SOC definíció szerint egy százalékban kifejezett érték, melyet úgy kapunk, hogy a cella amperórában (Ah) megadott elérhető kapacitását ($C_{available}$) viszonyítjuk a cella névleges kapacitásához (C_{rated}):

$$SOC = \frac{C_{available}}{C_{rated}} \times 100\%$$

Ezen kívül más SOC meghatározások is léteznek, amelyek nem a névleges kapacitást veszik 100%-nak. Az egyik a mért kapacitás ($C_{measured}$, C_m) amely alatt a teljesen feltöltött és a teljesen lemerített állapotok közti kapacitást értjük. [4]

2.2.6 Aktuális kapacitás, SOH State of Health

Az akkumulátor az élettartama alatt, különböző degradációk miatt folyamatosan veszít a kezdeti kapacitásából. Az SOH viszonyszám azt mutatja meg, hogy mekkora az akkumulátor cella aktuális kapacitása a kezdeti kapacitáshoz viszonyítva:

$$SOH(t) = \frac{Current\ capacity}{Initial\ capacity} \times 100\%$$

3 Az akkumulátormonitorozó rendszerek fő tulajdonságai és funkciói

Az elektromos járművekben leggyakrabban használt akkumulátor típusok a lítium-ion alapúak (lithium-ion based: LIB), nikkel-kadmium (Ni-Cd vagy NiCad), nikkel-metál-hidrid (Ni-MH). Ezek közül a lítium-ion alapúak könnyebbek, nagyobb a fajlagos energia sűrűségük, hosszabb az élettartamuk és nagyobb árammal lehet őket tölteni, illetve kisütni, mint a többi. Habár a lítium-ion alapú akkumulátor cellák egyre elterjedtebbek és a felhasználási területük egyre sokrétűbb, az autóiparban elvárt teljesítményre, kapacitásra és élettartamra vonatkozó követelmények teljesítése még mindig komoly kihívást jelent. Azért, hogy javítani lehessen az akkumulátor gazdaságosságán és élettartamán, elengedhetetlen az akkumulátor állapotának megértése és kontrollálása a különböző paramétereken keresztül, mint például a töltöttségi szint (SOC), hőmérséklet, töltési és kisütési feltételek. Ezért nélkülözhetetlen az akkumulátor felügyeleti rendszer, amely biztosítja az akkumulátor biztonságos, hatékony és megbízható működését. [5]

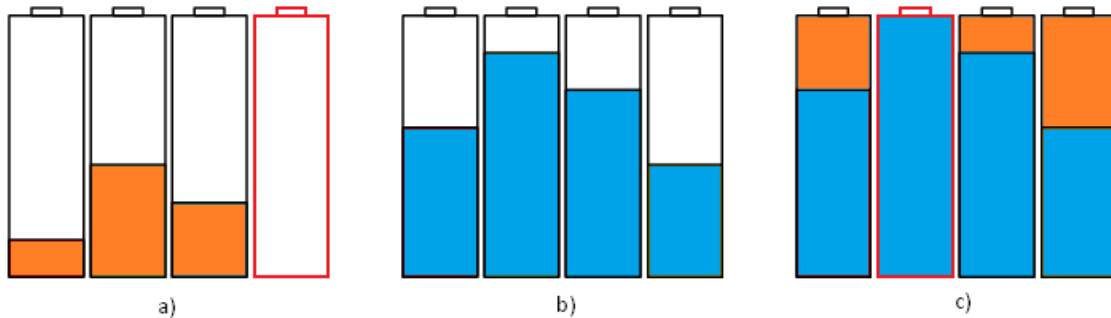
3.1 Működési elv (Akkumulátorcellák kiegyenlítése)

Az akkumulátort a követelmények kielégítése végett jellemzően több cellából épül fel, az akkumulátor feszültségének növelése a cellák soros kapcsolásával, a kívánt kapacitás és az akkumulátor áram a cellák párhuzamos kapcsolásával érhető el.

Az akkumulátort felépítő cellák között alapvetően kezdetben is lehetnek különbségek pl. kapacitásban, belső ellenállásban, töltöttségi szintben, majd az akkumulátor használata során különbözően öregedhetnek például azért, mert eltérő hőhatásoknak van kitéve az akkumulátor pakk szélén levő cella, mint az ami az akkupakk közepén helyezkedik el. Ezek a különbségek azt eredményezik, hogy az egyes cellák egymáshoz viszonyítva nem egyformán merülnek le vagy töltődnek fel.

Az akkumulátor kisütését akkor kell leállítani, amikor valamelyik cella teljesen lemerül, hogy a cella ne veszítsen jelentősen a kapacitásából és ne alakuljon ki benne belső rövidzárlat, tehát a biztonságos üzemeltetéshez sükségen tartományon belül maradjon. Ekkor a többi cellában tárolt töltés már nem használható fel, tehát ez az akkumulátor teljes kapacitásának kihasználatlanságát eredményezi. Hasonló a helyzet a

feltöltés közben. Az akkumulátor nem tölthető tovább akkor, amikor az első cella teljesen feltöltődik, mert az instabil belső állapotokat okozhat, a cellákban magas nyomáshoz, végül pedig termikus megfűtáshoz vezethet. Ezáltal a többi cella nem tölthető fel teljesen, ami ahhoz vezet, hogy az akkumulátor kihasználható kapacitása csökken.



1. ábra: Eltérő töltöttségű cellák kihasználatlan kapacitásának szemléltetése.

a) lemerítve b) használat közben c) feltöltve

Ezekre a problémákra nyújt megoldást a cellák töltés kiegyenlítése. A cellák kiegyenlítésére pedig két elterjedt módszer van, az aktív és a passzív kiegyenlítés. [6]

3.1.1 Aktív kiegyenlítés

Az aktív kiegyenlítés során a BMS az energiát a nagyobb feszültségű cellákból áttölti a kisebb feszültségű cellákba. Ennek előnye, hogy a már az akkupakkban tárolt energia jelentős része az akkupakkban is marad, csak az áttöltés során keletkező veszteség disszipálódik a BMS alkatrészein. Ezért ez a módszer töltési, kisütési, és nyugalmi periódusokban is használható. Így ezzel a módszerrel maximális feltöltés és kisütés érhető el, tehát jobban kihasználható vele az akkumulátorpakk teljes kapacitása. Az aktív kiegyenlítés hátránya az, hogy a kiegyenlítéshez bonyolult algoritmus kell, és a megvalósításához szükséges alkatrészek és kapcsolóelemek drágák, cellánként egy-egy DCDC konverter szükséges hozzá. [7]

3.1.2 Passzív kiegyenlítés

Ezzel szemben a passzív kiegyenlítés a cellafeszültségek alapján a magasabb feszültségű cellákból ellenállásokon keresztül disszipálja el az energiát, amíg a cellafeszültségek ki nem egyenlítődnek. A passzív módszer legnagyobb hátránya az, hogy a disszipált energia elvész az akkumulátorból, ezért csökken az akkumulátor töltöttsége, illetve mivel az energiát ellenállásokon kell elfűteni, így nagyobb hő keletkezik, ezért

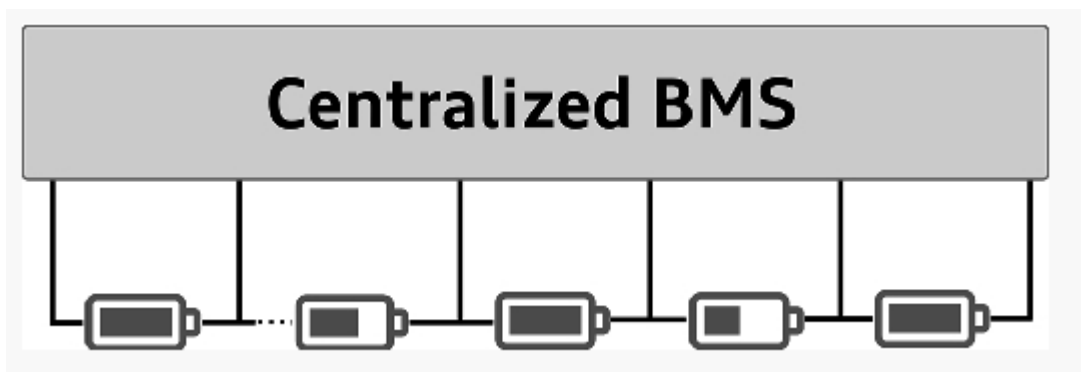
biztosítani kell azt, hogy a rendszer ne melegedjen túl. Másik hátrány, hogy csak töltés közben érdemes használni, hiszen a használat közbeni kiegyenlítés a disszipáció miatt hamarabb lemeríti a cellákat. Tehát ez a módszer csak azt biztosítja, hogy a feltöltésnél maximálisan fel legyen töltve mindegyik cella, de mivel a kisütési vagy a nyugalmi időszak közben nem ajánlott alkalmazni, ezért a kisütés közben a cellák közti különbségek miatt nem biztosítható, hogy minden cella egyformán merül le. Így az akkumulátor addig használható amíg az első cella le nem merül, a többi cellában maradt töltés nem használható fel a lemerült cella feltöltésére. Az akkumulátorban így megmaradt energiával csökken az akkumulátor felhasználható kapacitása. Előnye ennek az eljárásnak az, hogy egyszerű algoritmussal és kevés alkatrésszel megvalósítható. Legtöbbször cellánként egy ellenállás és egy kapcsoló soros kapcsolásából áll. A tapasztalat azt mutatja, hogy a kutatásoknak és modern gyártás technológiáknak köszönhetően az akkumulátor cellák közötti paraméter különbségek egyre kisebbek, ezáltal a kiegyenlítetlenség is egyre kisebb, ezáltal az aktív kiegyenlítéshez képest költséghatékonyabb és egyszerűbb passzív kiegyenlítés optimálisabb választás lehet az újabb akkumulátor cellák alkalmazása esetén. [8]

3.2 Topológiák

A BMS topológiája nagyban meghatározza a rendszer megbízhatóságát, skálázhatóságát és rugalmasságát. Ezen felül befolyásolja a kommunikáció felépítését, az akkumulátor cellák összeköttetéseit, a költséget, az installáció bonyolultságát és a karbantartás bonyolultságát. [9]

3.2.1 Centralizált topológia

A centralizált topológiában egy master egység van, az összes funkció ebben van megvalósítva. Az akkumulátorokhoz vagy akkumulátor cellákhoz vezetékekkel csatlakozik. Lehetőség van minden cella feszültségmérésére, a sorosan kapcsolt cellákon folyó áram mérésére és hőmérséklet mérésre.



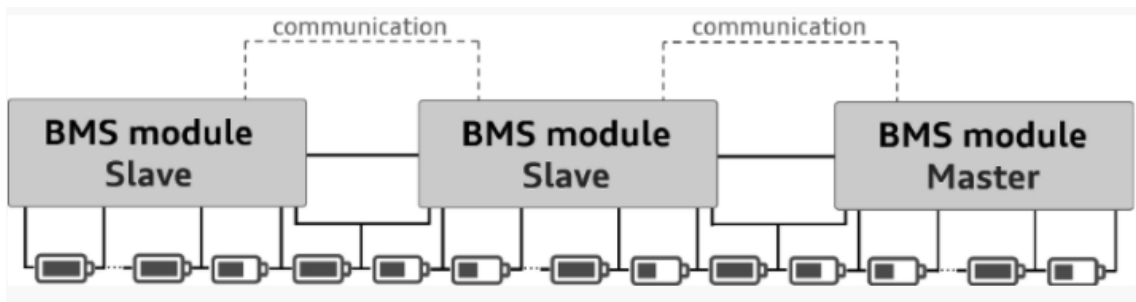
2. ábra: Centralizált BMS topológia

Egy integrált áramkör képes a teljes modult kontrollálni, ami költségghatékony, egyszerű a karbantartása és a javítása. Installáció során figyelni kell arra, hogy az akkumulátor cellák kivezetései a BMS megfelelő bementekre legyenek csatlakoztatva, ezek felcserélése hibát okoz.

A cellák maximális számát az adott integrált áramkör korlátozza, ezáltal limitált a rendszer skálázhatósága. Ha a controller elromlik az egész rendszer elromlik, ami a rendszer megbízhatóságát rontja.

3.2.2 Moduláris topológia

Ebben a megközelítésben a rendszer egyforma modulokból épül fel. A centralizált megoldáshoz hasonlóan a cellák kivezetéseit itt is vezetékekkel kell a BMS bemeneteivel összekötni. A modul a méréseken felül kommunikációs interfészt is biztosít a többi modullal való információcseréhez, gyakran az egyik modul tölti be a master szerepét a rendszerben. A master modul kontrollálja a teljes akkumulátort a többi modul által szolgáltatott adatok alapján, és szintén a master modul kommunikál a jármű többi rendszerével.



3. ábra: Moduláris BMS topológia

A moduláris BMS megbízható és költséghatékony megoldás elektromos járművekhez. Minden cella egyesével monitorozva van, és sok cellából álló akkumulátor felügyeletét is lehetővé teszi.

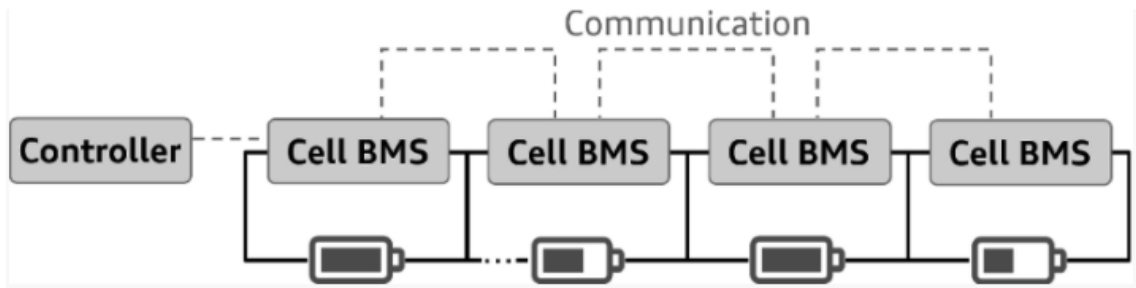
A centralizált megoldáshoz képest rövidebb kábelek kellenek a cellákhoz való csatlakozáshoz, hiszen az egyes modulok közelebb tehetőek a hozzájuk tartozó cellákhoz.

A rendszer jól skálázható, hozzáadott cellák esetén egy vagy több modullal bővíthető. Az egyes modulok bemeneteinek száma fix, így lehet, hogy néhány bemenet kihasználatlan marad.

Egy modul meghibásodása esetén a rendszer továbbra is működő képes marad, a hibás egység eltávolítható a rendszerből, de fontos megjegyezni, hogy ez kapacitás csökkenéssel jár.

3.2.3 Elosztott topológia

Az elosztott topológiában minden cellához külön BMS tartozik, amik a cella paramétereit mérik, illetve a kiegyenlítést végzik, valamint kommunikációs interfésszel is rendelkeznek. Ezen kívül van egy dedikált irányító BMS modul, ami kezeli a kommunikációt és elvégzi az akkumulátor paraméterekhez tartozó számításokat.



4. ábra: Elosztott BMS topológia

Ez a fajta kialakítás egyszerre nyújt nagyfokú robusztusságot és megbízhatóságot, valamint skálázhatóságot és rugalmasságot. Cellákat az installáció után is hozzáadhatunk az akkumulátorhoz vagy kivethetünk a rendszerből. Az adott applikációhoz való skálázás nem igényel sem hardver, sem szoftver módosítást.

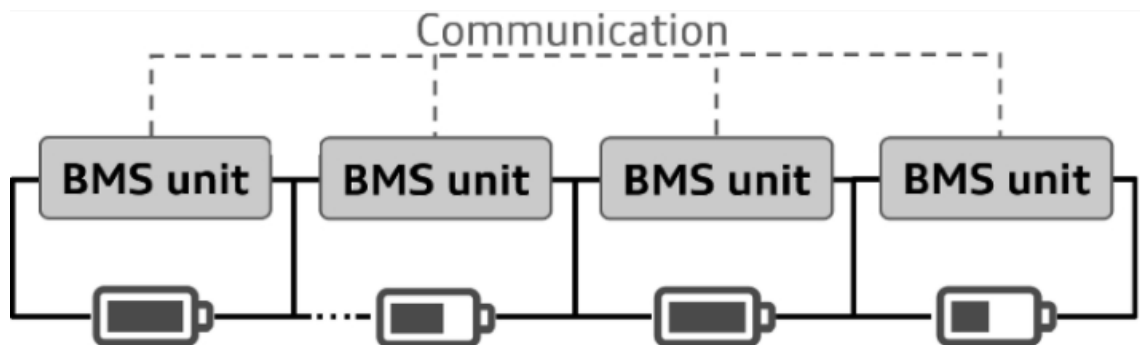
Egy meghibásodás esetén a rendszer üzemképes marad. A BMS közvetlenül a cella mellett van így a mérések a rövid vezetékezésnek köszönhetően pontosabbak az előző két topológiánál.

Hátránya a relatív magas ára, hiszen minden cellához külön BMS szükséges.

3.2.4 Decentralizált topológia

A decentralizált topológia a centralizált topológia hátrányait küszöböli ki. A rendszer több egyforma BMS egységből áll, amelyek teljes és önálló funkcionális bizonysítanak lokálisan az általuk felügyelt akkumulátor cellák számára, tehát minden egyes BMS képes működni a többtől függetlenül. Az egységek közötti kommunikáció pedig lehetővé teszi az információcserét és az együttműködést az egységek közt.

A decentralizált topológia tovább bontható kommunikáció nélküli, illetve vezetékes, valamint vezeték nélküli kommunikációval rendelkező megvalósításokra.



5. ábra: Decentralizált BMS topológia

Ennek a struktúrának a fő előnye, hogy nincs benne központi irányító egység, amittől az akkumulátor hiba mentes működése függene, valamint jó a skálázhatósága.

Hátrányt a működés bonyolultsága jelent, mert nehéz az elosztott irányítás megvalósítása a parallel működésű BMS egységeken.

3.3 Kommunikáció

A BMS-nek folyamatos kétirányú kommunikációt kell fenntartania a külvilággal, a jármű többi vezérlőegységével, és a BMS-en belül az egyes egységek között is szükség van adatcserére.

3.3.1 Külső kommunikáció

A járműszintű kommunikáció során a BMS állapot frissítéseket küldhet a jármű többi vezérlőegységének, az akkumulátor töltöttségéről, hőmérsékletéről, az elérhető kapacitásról, illetve az esetleges meghibásodásokról. Másrészt a többi vezérlőegységtől származó olyan adatokat is elérhet, amire a BMS-nek szüksége van a működéséhez, ilyen lehet az egyes fogyasztók teljesítmény vagy áram igénye, a külső hőmérséklet a termikus felügyelethez. Az jármű fő funkcióinak biztosítása érdekében kérheti a kevésbé fontos vagy kényelmi funkciókat szolgáltató fogyasztók áramigényének csökkentését vagy a fogyasztók lekapcsolását az akkumulátorról, töltés közben közölheti a töltővel a kívánt töltőáram nagyságát.

A mai járművek legelterjedtebb kommunikációs interfésze a CAN kommunikáció, ezért praktikus, ha a BMS is rendelkezik CAN interfésszel és ezen keresztül cserél információt a jármű többi vezérlőjével.

3.3.2 Belső kommunikáció

A BMS adott esetben több kisebb modulból áll, vagy egységből, vagy egy kijelölt master-ből és slave egységekből.

A BMS központi modul és a BMS többi része közt szükséges a mérési eredmények továbbítása a központi modul felé, a központi modul pedig ezen információk alapján döntést hoz és elküldi a többi egységnek a kéréseit.

A modulok a tápellátásukat az általuk monitorozott cellákból veszik. Ebből fakad az, hogy a modulok eltérő feszültség szinten is működhetnek, egy 400V feszültségű akkumulátor esetén a legkisebb potenciájú cellákat monitorozó egység és a legnagyobb potenciálon levő egység saját földpotenciálja között a különbség majdnem 400V lehet, az eltolt feszültségen történő működés miatt az egységek közötti kommunikációhoz érdemes leválasztott kommunikációs megoldást alkalmazni.

3.4 Mért paraméterek

3.4.1 Feszültség

A lítium-ion celláknak egy meghatározott feszültség tartományon belül kell működniük. Ezek a tartomány határok az akkumulátor cella belső kémiai összetételétől és pillanatnyi hőmérsékletétől függenek.

A hosszabb élettartam érdekében ezek a tartományhatárok tovább szűkülhetnek. A BMS-nek tudnia kell mik ezek a határok, és ez is befolyásolja a döntéshozásban. Például töltés közben a felső limithez közeledve, kérheti a töltő áram fokozatos csökkentését, illetve a töltés befejezését a töltő áramkörtől. A kisülés közben az alsó limithez közeledve kérheti a fogyasztóktól az áramfelvétel csökkentését vagy beszüntetését.

Ehhez a BMS-nek természetesen feltétlenül figyelnie kell a teljes akkumulátor feszültségét, illetve egyesével az akkumulátorcellák feszültségét is.

3.4.2 Áram

Az elektromos paraméterek közül a másik legfontosabb az akkumulátor árama, aminek mérése kulcsfontosságú, hogy az akkumulátor árama ne lépje túl a biztonságos töltő, illetve kisütő áramot.

A lítium-ion cellák töltő áramára és kisütő áramára eltérő korlátok vonatkoznak, és az akkumulátor mindkét üzemmódban képes ennél nagyobb áramra, de csak rövid ideig. A cella gyártó határozza meg a limiteket a töltő és a kisütő áram korláthoz, illetve a töltő és kisütő áram csúcsértékét, jellemzően a csúcsértékek hosszára vonatkozó maximális időtartammal együtt.

A folyamatos áramfelvételre és leadásra vonatkozó limiteket a BMS-nek be kell tudni tartania, de hirtelen terhelésváltáskor túllépheti ezeket rövid időre.

3.4.3 Hőmérséklet

Az áram és a feszültség mellett a hőmérséklet mérése és kontrollálása is szükséges az akkumulátor cellák hibátlan működéséhez. A lítium-ion akkumulátorok viszonylag széles hőmérséklet tartományon képesek üzemelni, ezen belül az LTO cella kifejezetten jól bírja a hideget, akár -40°C -ig is működő képes.

Általánosságban elmondható, hogy a lítium-ion cellák kapacitása a hidegben lecsökken, mert a kémiai reakciók sebessége számottevően lelassul. Alacsony hőmérsékleten a lítium-ion cellák esetén a töltés okozhatja a legnagyobb gondot. Az akkumulátorban alacsony hőmérsékleten történő töltés közben a lítium az anód körül galvanizálódik, ezzel csökken az aktív lítium mennyiség, ezzel pedig az akkumulátor kapacitása. Extrém esetben a cellán belül belső rövidzár jöhet létre.

A hőmérséklet emelkedésével, gyorsulnak a kémiai reakciók, a kémiai reakciókból pedig hő szabadul fel, ami tovább emeli a hőmérsékletet, ez kontrol nélkül hőmegfutást idézhet elő, akkor a cellában termelődő hőmennyiség meghaladja a leadott hő mértékét.

Tehát az akkumulátor hőmérsékletének méréséhez, hőmérséklet szenzorokra van szükség. Az akkumulátor belső hőmérséklete nem egyezik a felületen mért hőmérséklettel, hanem annál melegebb. Ennek mérése közvetlenül is lehetséges a cella belsejébe integrált apró hőmérsékletszenzorok segítségével. Ez egy komplex eljárás és ezért drága is. A belső hőmérséklet modell alapú megközelítéssel a felületen mért hőmérsékletből számolható, ehhez a pontos termikus modell megismerése szükséges, valamint a szenzorokat úgy kell elhelyezni, hogy pontos képet lehessen alkotni a hőmérsékletről minden pontban, ne alakulhassanak ki vakfoltok.

3.4.4 Hűtés mértéke, lég vagy folyadék hűtésű akkumulátoroknál

A hőmérséklet kontrollálásához a járműveken sok esetben nem elég a menetszél által biztosított hűtés, illetve városi forgalomban, lehet, hogy egyáltalán nincs is menetszél. Ezért aktív hűtésre van szükség, ami lehet lég- vagy folyadékhűtés. Ez kritikus funkció, hiszen enélkül nem biztosítható az akkumulátor hőmérsékletének a definiált limitek között tartása. A hűtőközeg áramlási sebességének mérésével megbecsülhető az akkumulátorból elszállított hőmennyiség, ami segít a hőmérséklet biztonságos keretek között tartásában.

3.5 A működés közben detektálható hibák

Minden igyekezetünk ellenére a lítium-ion cellák élettartama során jelentkezhetnek különféle külső vagy belső hibák, amelyek olyan súlyos következményekhez vezethetnek, mint a cella hőmegfutása, kigyulladás vagy felrobbanása. Ezért fontos, hogy a BMS rendelkezzen hiba diagnosztikával, ami időben detektálja a hiba kialakulását így lehetővé téve a gyors beavatkozást.

A biztonságos működési tartományon kívüli üzemelést a BMS többféleképpen kerülheti el a topológiától függően. Aktívan beavatkozhat a környezeti paraméterekbe, fűtéssel, ventilátorral, légkondicionálással vagy folyadékűtéssel. Kérheti az akkumulátorra csatlakozó fogyasztókat, hogy csökkentsék a fogyasztást vagy fejezzék be az akkumulátor használatát. Végző esetben saját belső kapcsoló elemmel, ami lehet relé vagy solid state switch, leválaszthatja az akkumulátort a környezetéről. [10]

3.5.1 Belső hibák

Tipikusan belső hibának tekinthető a túltöltés, a túlkisütés, a külső és belső rövidzár. Ezek a hibák közvetlenül magukban hordozzák a túlmelegedés, a nyomásnövekedés és a hőmegfutás kockázatát. A belső hibák detektálása kihívást jelent, mert az akkumulátor belső állapotát nem lehet közvetlenül megmérni csak következtetni tudunk rá, az akkumulátor működése alapján, ilyen hibát jelenthet például a feszültség esés, SOC esés, hőmérséklet emelkedés, valamint a belső ellenállás emelkedése.

3.5.1.1 Túltöltés

A túltöltés egy olyan hiba, ami a cella gyorsított degradációját vagy hőmegfutását idézi elő. A lítium-ion cellák eltérő kapacitásából, a pontatlan feszültség vagy áram mérésből, illetve a BMS pontatlan SOC becsléséből adódhat, de a töltő meghibásodása is okozhatja. A túltöltés az akkumulátorcella alkotórészeinek olyan elektrokémiai reakcióit indítja be, ami az aktív anyagok csökkenéséhez és gázképződéshez vezet. A felgyülemlett gáz addig növeli a cella belső nyomását, amíg az deformálódni kezd vagy felrobban.

3.5.1.2 Túlkisütés

A cella túlzott lemerítését a túltöltéshez hasonlóan okozhatja a feszültség vagy árammérési és SOC becslési pontatlanság. A túlzott lemerítés következménye, hogy az elektrolit szilárd fázisba lép át az anód körül, így nagyobb lesz a cella belső ellenállása és kevesebb aktív anyag marad a cellában, ezáltal kapacitásvesztéshez és a termikus

tulajdonságok romlásához, termikus instabilitáshoz vezet. Ha az anód potenciálja annyira megemelkedik, hogy oxidálhatja az akkumulátorban levő rezet, akkor a pozitív töltésű réz ionok beoldódva az elektrolitba átjuthatnak a szeparátoron is belső rövidzárlatot kialakítva.

3.5.1.3 Belső rövidzár

A belső rövidzárlat okai lehetnek belső folyamatok (pl. túltöltés) vagy külső behatások. A lítium-ion cellákban akkor jön létre belső rövidzárlat, amikor az anódot és a katódot elválasztó szeparátor tönkre megy. A szeparátor tönkremenetelét okozhatja a magas hőmérséklet, ami megolvasztja, a cella deformációja, dendrit keletkezése, összenyomás vagy ütés. Ezek a hatások lyukat ütnek a szeparátoron, aminek a feladata az, hogy elválassza egymástól a két elektródát, az anódot és a katódot, ennek hiányában a két elektróda közt rövidzárlat alakul ki.

3.5.1.4 Külső rövidzár

Külső rövidzárlat akkor keletkezik, ha az akkumulátor cella sarkai közt valahogyan kis impedanciájú összeköttetés alakul ki. Az összeköttetést okozhatja beázás, vagy ütközéskor bekövetkező deformáció, például a hővezető fém alkatrész és a cella úgy deformálódik, hogy egyszerre ér hozzá a cella mindkét elektródájához.

3.5.1.5 Túlmelegedés

Túlmelegedést valamilyen más hibából adódó túlfeszültség vagy a korábban már leírt belső és külső rövidzárlat okozhatnak. A túlmelegedés által a katód gyorsan degradálódik, az anód oldalán úgynevezett „solid electrolyte interphase” (SEI) réteg alakul ki, ez jelentős kapacitás csökkenést eredményez. Sok esetben a képződő gáz buborékok által felépített nyomás a cella szétrobbanásához vezet. A másik következmény a hőmegfutás lehet, egy kritikus hőmérséklet felett, amikor a hő nem tud olyan gyorsan távozni a cellából, mint amilyen gyorsan termelődik.

3.5.1.6 Hőmegfutás

Az összes fent leírt hiba okozhat termikus megfutást, valamint okozhatja extrém nagy töltő áram és magas hőmérséklet is. Léghűtés esetén a korlátozott légáramlás is eredményezhet hőmegfutást. A hőmegfutás valószínűsége növekszik a cella ciklusszámával. A termikus megfutás visszafordíthatatlan folyamat, a cellában ilyenkor végbemenő exoterm kémiai folyamatok mennek végbe, ami magas hőmérséklettel jár, a

keletkező gázbuborékok pedig a nyomást növelik a Li-ion cellában, ami szétfeszíti a burkolatot. A nagymennyiségben keletkező gázok gyúlékonyak és mérgezőek.

3.5.2 Külső hibák

A külső hibák nem közvetlenül a cellákat érintik, hanem a BMS más funkcióit, amik viszont belső hibákat okozhatnak. Gyakori külső hibának számít az érzékelők, beleértve a feszültség, az áram és a hőmérséklet szenzorokat, a hűtési rendszer vagy a cella összeköttetések tönkremenetele. Ezek közül a hűtési rendszer hibája a legsúlyosabb, mert a hűtés hiánya közvetlen termikus hibához vezet.

3.5.2.1 Szenzor hibák

Kulcsfontosságú egy megbízható szenzor hiba detektálási stratégia implementálása a BMS-be az akkumulátor biztonságának és teljesítményének megőrzéséhez. A belső akkumulátor cellák hibái is megelőzhetőek, elkerülhetőek, ha egy szenzor meghibásodása detektálható a BMS által.

A hőmérséklet szenzor vagy szenzorok meghibásodása esetén a BMS téves információkat kap az akkumulátor hőmérsékletéről, ami termikus meghibásodást vagy élettartam csökkenést eredményezhet.

A feszültség érzékelés elromlása esetén egy-egy cella vagy a teljes akkumulátor átlépheti az alsó vagy felső feszültség korlátot. A feszültség mérés alapján becsült SOC és SOH paraméterek becslői rossz bemeneti értékekkel dolgoznak, ami túltöltést vagy túlzott kisütést idézhet elő.

Az akkumulátor árammérésének szenzor hibából fakadó pontatlansága az ebből számított paraméterek helytelen becslését eredményezi. Az többek között helytelen SOC becslés túltöltéshez vagy túlmelegedéshez is vezethet.

3.5.2.2 Hűtő vagy fűtő rendszer hibája

A hűtés biztosítja az akkumulátorban termelődött hő elvezetését a celláktól a külvilág felé, biztosítva azt, hogy az akkumulátor cellák az előírt biztonságos hőmérsékleti tartományban legyenek. Meghibásodása esetén túlmelegedés és hőmegfutás alakul ki az akkumulátorban.

A fűtés hideg esetén biztosítja a kisütéshez és a töltéshez előírt minimum hőmérséklet meglétét. Ennek hiánya alacsony hőmérsékletű töltést okozhat, ami a cellák kapacitásának és élettartamának csökkenéséhez vezet.

3.5.2.3 Cellák közötti csatlakozás hibája

A cellák csatlakozási hibája azt jelenti, hogy a cellák kivezetései közötti összeköttetések vezetőképessége romlik a vibráció okozta meglazulás vagy korrózió miatt. Ez megnöveli az ellenállást, ami melegedést okoz, amit hőmérséklet érzékelők jelezhetnek. A hiba a cellafeszültségeket is megnöveli, ami a feszültség méréssel detektálható. A megnövekedett ellenállás miatt az áram lecsökken az adott cella soron, ami által az akkumulátorban nagyobb SOC eltérések alakulhatnak ki.

3.6 Számított paraméterek

A BMS feladata a hőmérséklet-, áram- és feszültségmérések alapján az akkumulátor cellák belső állapotváltozóinak becslése. [11]

3.6.1 Feszültség: minimum és maximum cella feszültség

A BMS-nek a működés során figyelnie kell azt, hogy mindegyik cella a kívánt minimum és maximum feszültség korlát között legyen. Ehhez praktikus folyamatosan figyelni az aktuális maximális és minimális cella feszültséget.

3.6.2 SOC becslés

3.6.2.1 Kisütési áram integrálása, másnéven coulomb számlálás

A coulomb számlálás vagy áram integrálás a legelterjedtebb technika SOC becslésre. Az akkumulátor áramát kell integrálni idő szerint, így megtudjuk, hogy mennyi amperóra fogyott el, ebből pedig ki tudjuk számolni a fennmaradó töltést. A töltöttségi szintet a következő egyenlettel becsülhetjük meg:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \times \int_{t_0}^t I_b dt$$

ahol $SOC(t_0)$ a kezdeti töltöttségi szintet, C_{rated} a névleges kapacitást, I_b az akkumulátor áramát jelöli. A módszer pontosságához elengedhetetlen egy precíz árammérési módszer alkalmazása és a pontos kezdeti SOC becslés.

A módszer gyengesége az, hogy az akkumulátorban töltés és kisütés során keletkező veszteségeket és az önkisülést nem tudja figyelembe venni, ez a hiba összegződik a becslés során, így a becslés egyre távolabb lesz a valós értéktől. A pontos becsléshez a veszteségekkel is kalkulálni kell, vagy időnként újra kell kalibrálni a számítást, például a töltés végén, teljesen feltöltött állapotban.

3.6.2.2 Feszültség mérési módszer

A feszültség mérési módszer az akkumulátor feszültségéből határozza meg a töltöttségi szintet, felhasználva az előre ismert kisülési (feszültség-töltöttségi szint) görbét. Ennek a görbének a megismeréséhez szükséges az akkumulátor tesztje ellenőrzött körülmények között, ez nehezíti ennek a módszernek az implementálását. De a feszültséget az akkumulátor pillanatnyi árama és a hőmérséklet jelentősen befolyásolja.

$$SOC = f(V(T, I_b))$$

Ahhoz, hogy ez a becslési módszer pontosabb legyen, szükséges az áram és a hőmérséklet szerint is kompenzálni.

Az akkumulátor fejlesztések egyik célja, hogy a cellafeszültség a teljes töltés, illetve kisülés alatt is, tehát az SOC-től függetlenül, amennyire lehet konstans maradjon. Ezáltal olyan akkumulátorok jönnek létre, amelyekben nagyon kis feszültség változás, viszonylag nagy SOC változást jelenthet, ez egyre jobban nehezíti, hogy a feszültség alapján megbecsülhető legyen a töltöttségi szint.

Látható, hogy a két becslési módszer önmagában pontatlan, de sokkal hatékonyabb módszert érhetünk el, ha a két eljárást ötvözzük egymással.

3.6.2.3 Kálmán szűrő

A Kálmán szűrő segítségével pontosabban lehet megbecsülni az SOC-t, mint a Coulomb számlálással vagy a feszültség mérési módszerrel. Az akkumulátor működése tartalmaz nemlinearitásokat, melyeket az eredeti Kálmán-szűrő nem tud jól becsülni. Nemlineáris rendszerek esetén az Extended Kalman Filter (EKF) vagy az Unscented Kalman Filter használata pontosabb becslést eredményez.

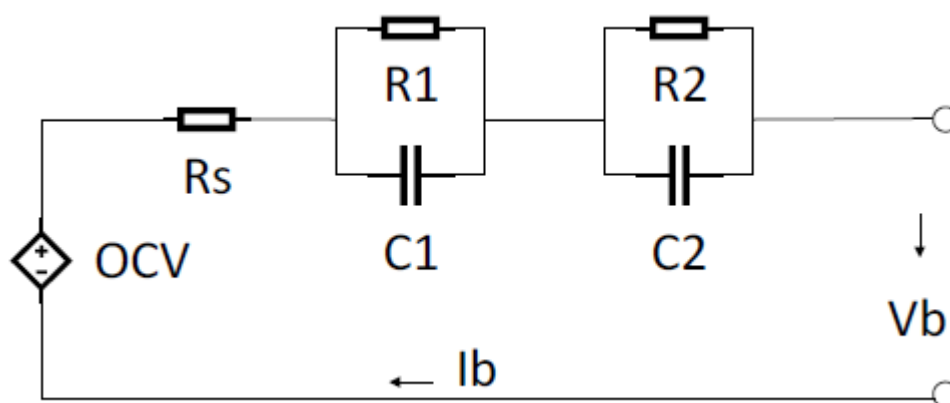
A Kálmán szűrővel becslést adhatunk a rendszer belső, közvetlenül nem mérhető állapotváltozóira is, ilyen állapotváltozó az SOC is. A Kálmán szűrő az aktuális mért bemenő adatokból és a korábbi mérésekből kapott belső állapotváltozóiból a kimenetre adott becsléséből súlyozva állítja elő a kimenetét. A szűrő figyelembe veszi a mért adatok

zajosságát, bizonytalanságokat és pontatlanságokat, tehát a zajos mérésekből egy optimális becslést ad a becsült állapotváltozóra, amely pontosabb mintha egy mérést végeztünk volna el.

A becsléshez szükség van az akkumulátornak, ami egy elektro-kémiai rendszer, az elektromos helyettesítő képére. Ehhez az akkumulátor másodrendű Thevenin helyettesítő képét használhatjuk, mely a 6. ábrán látható. Az R_s ellenállás a DC ellenállásnak, azaz a belső ellenállásnak felel meg. Az OCV az üresjárási feszültség, egy feszültség forrás vagy vezérelt feszültség forrás, feszültsége függ az SOC-tól.

Az akkumulátor tranziens viselkedését két párhuzamos RC hálózat soros kapcsolásával írjuk le. A kisebb időállandójú R_1 - C_1 a töltésátviteli folyamatokat és az akkumulátor felépítéséből adódó kapacitást modellezi, ahol az anód és a katód a két fegyverzet. A nagyobb időállandójú R_2 - C_2 tag a diffúziós folyamatok hatását jelképezi.

A becslés során az elemek értékei függenek az áramerősségtől, SOC-tól és hőmérséklettől.



6. ábra: Az akkumulátor elektromos helyettesítő képe.

3.6.3 Lemerítés mértéke, DOD Depth of discharge

A DOD azt mutatja meg, hogy mennyire van lemerülve az adott akkumulátor cella, ez a maximális kapacitáshoz viszonyított százalékos érték.

$$DOD(t) = 1 - SOC(t) = \frac{Q_0 - \int_0^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\%$$

3.6.4 Aktuális kapacitás, SOH State of health

Az SOH értéke megadja, hogy a kezdeti maximális kapacitáshoz viszonyítva az adott időpontban a kezdeti kapacitásnak még hány százaléka elérhető.

$$SOH(t) = \frac{\text{Current capacity}}{\text{Initial capacity}} \times 100\%$$

3.6.5 Elérhető teljesítmény, SOP State of Power

AZ SOP érték azt mutatja meg, hogy a cella a kezdeti teljesítmény hányad részét képes jelenleg leadni.

$$SOP(t) = \frac{\text{Current power}}{\text{Initial power}} \times 100\%$$

3.6.6 Maximális töltő áram, CCL Charge Current Limit

A maximális töltő áram a hőmérséklettől, az SOC-tól és a belső ellenállástól, tehát lényegében az akkumulátor aktuális állapotától függ. Az akkumulátor pillanatnyi töltőáramát a biztonságos működéshez töltés közben a CCL érték alatt kell tartani.

3.6.7 Maximum kisütő áram, DCL Discharge Current Limit

Hasonlóan a CCL értékhez, de az akkumulátor merítése közben leadott áramra vonatkozik. A DCL az az áram limit amekkora áramerősség mellett az akkumulátor nem károsodik és nem lépi túl a rendszer terhelhetőségét.

3.6.8 Összesített töltési-kisütési ciklusok száma

Az akkumulátor élettartamának becsléséhez szükséges a töltési ciklusokat számolni. Egy ciklusnak egy teljes lemerítés-feltöltés felel meg. A DOD használatával számolhatunk tört ciklusszámot, a DOD teljes lemerítésnél 100% azaz 1, részleges lemerítésnél pedig pont a lemerülés értékét adja meg. Ez azért is hasznos, mert nem mindig merül le teljesen az akkumulátor.

4 A monitorozó áramkör kiválasztása

A projektben egy 11 cellás LTO akkumulátor használatához kellett akkumulátormonitorozó egységet terveznem. A koncepció tervezésekor figyelembe vettem, hogy a rendszer később bővíthető legyen több, egyenként akár 16 cellás akkumulátorral, de megfelelően testre legyen szabva a jelenlegi 11 cellás LTO akkumulátorhoz is.

Előre adott volt az is, hogy passzív kiegyenlítést kell megvalósítani, mert ez olcsóbb, és sokkal egyszerűbb hardveresen és szoftveresen is realizálni, mintha aktív kiegyenlítést szeretnénk.

A következő táblázatban szereplő akkumulátormonitorozó áramkörök közül a Texas Instruments gyártmányú BQ79616-Q1 jelzésű termék lett kiválasztva. [12]

Manufacturer	TI	TI	NXP	NXP	ST
Type	bq7961x	bq79606A-Q1	MC33772 B	MC3377 1B	L9963
Category	Battery Monitor	Battery Monitor	Battery Monitor	Battery Monitor	Battery Monitor
Cell No.	6- 12, 14,16	3..6	3..6	7..14	14
Interface	UART	UART	SPI	SPI	SPI
Overvoltage protection	OVP	OVP	OVP	OVP	OVP
Undervoltage protection	UVP	UVP	UVP	UVP	UVP
Coulomb Counter	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Current Measurement	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Balancing	INT/EXT	INT/EXT	INT/EXT	INT/EXT	INT/EXT
ADC resolution	16 & 14	16	16	16	16
AEC-Q100	YES	YES	YES	YES	YES
ASIL	D	D	D	D	D
Status	Preview	Preview	Preview	Preview	Active
Price 100pcs	10	8	18	21	18

A kiválasztás során technikai szempontoknak mindegyik vezérlő megfelelt, a legnagyobb különbség, ami döntött az elegendő cellát kiszolgálni képes IC-k közül az az ár volt mert a BQ79616 10 dolláros árával a többi alternatíva nem tudott versenyezni. A másik nagy előnye, hogy egy darab elég ahhoz, hogy a 11 cellás akkumulátorpakkot monitorozni és kiegyenlíteni tudja. A követelmények a vezérlővel szemben azok voltak,

hogy rendelkezzen túlfeszültség védelemmel, alacsony feszültség védelemmel, tehát ne engedje a cellákat túltölteni vagy túlságosan lemerülni.

Szemponthoz volt továbbá, hogy lehessen vele az akkumulátor pakk áramát mérni, de ez a funkció végül a központi egységben lesz megvalósítva. Azonban van lehetőség a későbbiekben árammérő áramkör integrálására. Az áramjelet a később kiválasztott mérési módszer (például sönt ellenállás vagy Hall-effekt szenzor) segítségével feszültségjellé konvertálva, egy analóg bemeneten keresztül tudja mérni a BQ79616, illetve digitalizálva továbbítani a jelet a kommunikációs vonalon a központi egység számára. Az első mintában nem lesz árammérő funkció.

A 16 bites ADC konverzió mindegyik alternatívánál megfelelően pontos a cellafeszültségek mérésére. A kiválasztott BQ79616 két darab ADC konverterrel rendelkezik és a kettő eredményei egymással összehasonlításra kerülnek, ez egy plusz biztonságot ad. Ha az összehasonlítás során a különbség nagyobb, mint az előre beállított megengedett küszöbérték, akkor a monitorozó jelzi ezt a hibát a központi egység felé.

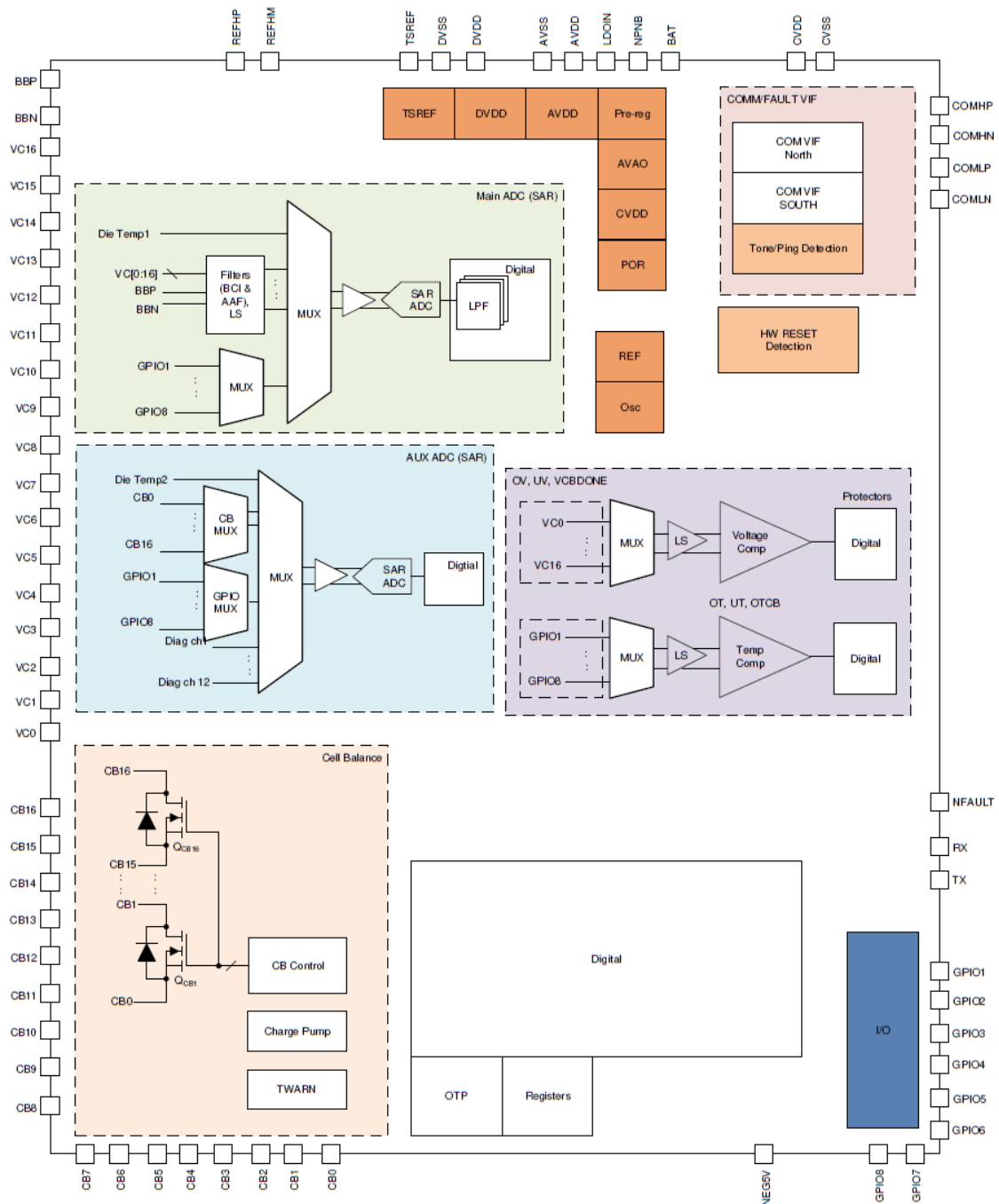
A Texas által gyártott eszköz rendelkezik az autóiparban megkövetelt AEC-Q100-as kvalifikációval, ami többek között azt jelenti, hogy megfelel a $-40 - +125^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleti követelmények, valamint az elektrosztatikus kisülésekkel szemben támasztott követelményeknek.

Egy másik fontos szempont a biztonságos működés érdekében az ISO26262 szabványban meghatározott ASIL (Automotive Safety Integrity Level) követelményeknek való megfelelés. Ebben a besorolásban az ASIL D a legmagasabb szint, ami azt jelenti, hogy az ASIL D besorolású komponensek meghibásodása súlyos balesethez, életveszélyes helyzethez vezethet. A kiválasztott vezérlő képes megfelelni az ASIL D kritériumoknak és biztonsági előírásoknak.

Tehát a kiválasztott vezérlő teljesíti az összes vele szemben támasztott követelményt, és a vizsgált alternatívák közül ez a legköltséghatékonyabb választás.

5 Blokkvázlat elkészítése

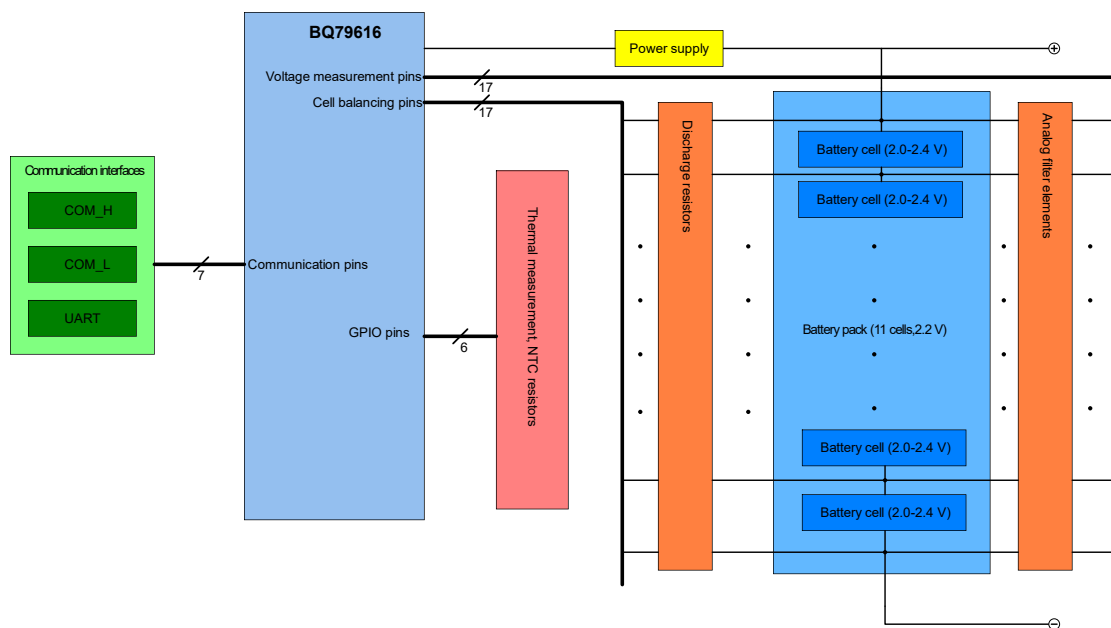
A blokkdiagram elkészítése során szem előtt tartottam a BMS-el szemben támasztott követelményeket. Már adott volt, hogy a vezérlőegység a Texas Instruments által gyártott BQ79616 típusú integrált áramkör köré fog épülni.



7. ábra: BQ79616 Funkcionális blokk diagram

A modult elsősorban egy dobozba beépített 11 darab 2.4 V-os LTO cellákból álló akkumulátorral kívánjuk használni, melyekre a vezérlő csavaros kontaktusokkal csatlakozik, mechanikailag és elektromosan is. Ugyanakkor a vezérlőnek képesnek kell lennie arra, hogy egy 16 cellás külső akkumulátorhoz csatlakozzon.

A fentiekből következett, hogy a mikrochip feszültségmérő bemeneteihez megfelelő differenciális aluláteresztő szűrőket kellett tervezni. A kiegyenlítő pinekhez pedig ellenállásokat kell beépíteni, illetve az ellenállások és a vezérlő chip közé itt is differenciális szűrő kondenzátorok beépítésére volt szükséges.

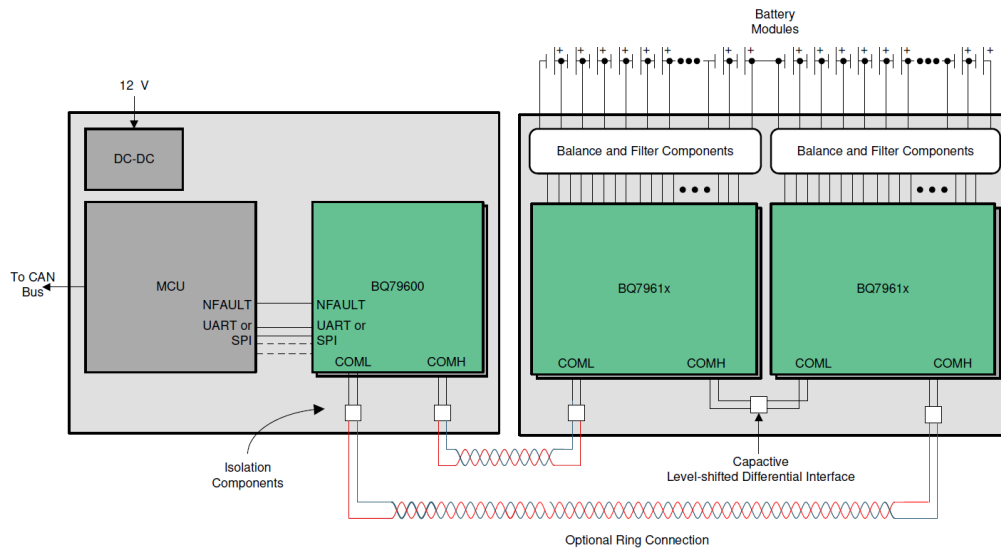


8. ábra: Az akkumulátor monitorozó és kiegyenlítő egység blokkvázlata

A hőmérséklet mérést negatív termikus koefficiensű ellenállások segítségével valósítja meg a tervezett egység. Ezek az ellenállások, vagy a nyomtatott áramkörön kerülnek elhelyezésre, úgy, hogy minél közelebb legyenek az akkumulátorok csavarjaihoz a jó hőátadás érdekében, de elektromosan elszigetelve tőlük, vagy külső akkumulátor esetén az akkumulátorhoz kivezetékezve és annak különböző pontjaira felragasztva.

Az utolsó fő blokk a kommunikációs interfészeket tartalmazza. A kommunikáció két részből áll, az első egy UART kommunikáció, amely a fejlesztés közben hasznos, hogy egy egyszerű protokoll használatával lehessen kommunikálni az akkumulátormonitorozó áramkörrel. A másik rész az úgy nevezett „daisy chain” kommunikáció, amely protokollja egy differenciális jelátvitelt jelent két vezetéken, és

ebből minden BQ79616 chip kettő interfésszel rendelkezik, annak érdekében, hogy a modulokat egy gyűrű topológiájú hálózatba lehessen felfűzni. Az alábbi ábrán bal oldalon látható a mikrokontroller és egy BQ79600 kommunikációs gateway, jobb oldalon pedig egy modulon elhelyezett két akkumulátormonitorozó egység. A CAN buszhoz hasonlóan, ami szintén differenciális jelátvitelen alapszik itt is csavart érpárral kell a vezetékezést bekötni a kártyák között.



9. ábra: A daisy chain kommunikáció és a gyűrű topológia 3 eszköz esetén

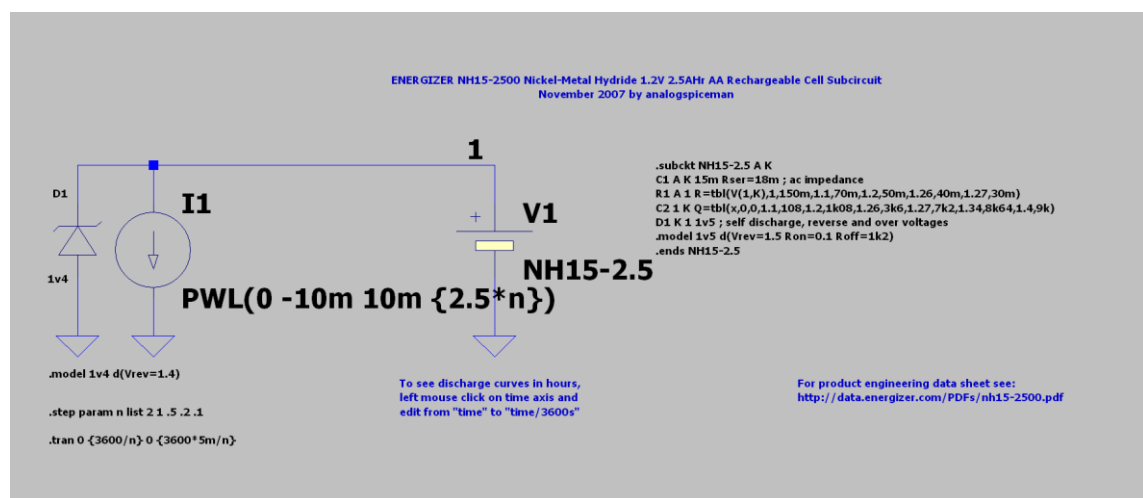
6 Szimuláció

A szimulációkat az LTSpice XVII programmal készítettem. Ez egy ingyenesen letölthető program, amibe nagyon egyszerűen beimportálhatóak az alkatrészek gyártók által előre elkészített PSpice modelljei.

6.1 Akkumulátor cella szimuláció meglévő modell módosításával

A szimulációhoz először az akkumulátor modelljét készítettem el. Az LTO cella modellezéséhez az Energizer NH15-2500 típusú 1.2V cellafeszültségű és 2.5 Ah kapacitású NiMH kémiaájú akkumulátor cella modelljét vettem alapul. Ennek értékeit módosítottam úgy, hogy azok közelítsenek a projektben használt lítium-titánium-oxid cella értékeihez.

A *subckt* írja le az akkumulátor belső modelljét, C1 az AC impedanciát jelenti, R1 a belső ellenállást írja le táblázatos formában, a feszültség-ellenállás pontpárok között lineáris interpolálással számol a modell. Az ellenállás a C2 akkumulátor kapacitás feszültségének a függvénye. A modellben a C2 kapacitás az akkumulátor kapacitása, a feszültség és SOC nemlineáris függését a kapacitás töltésére vonatkozó feszültség-töltésmennyiség pontpárok írják le, ezzel azt adjuk meg, hogy adott feszültségnél hány coulomb töltés van tárolva a kapacitásban.

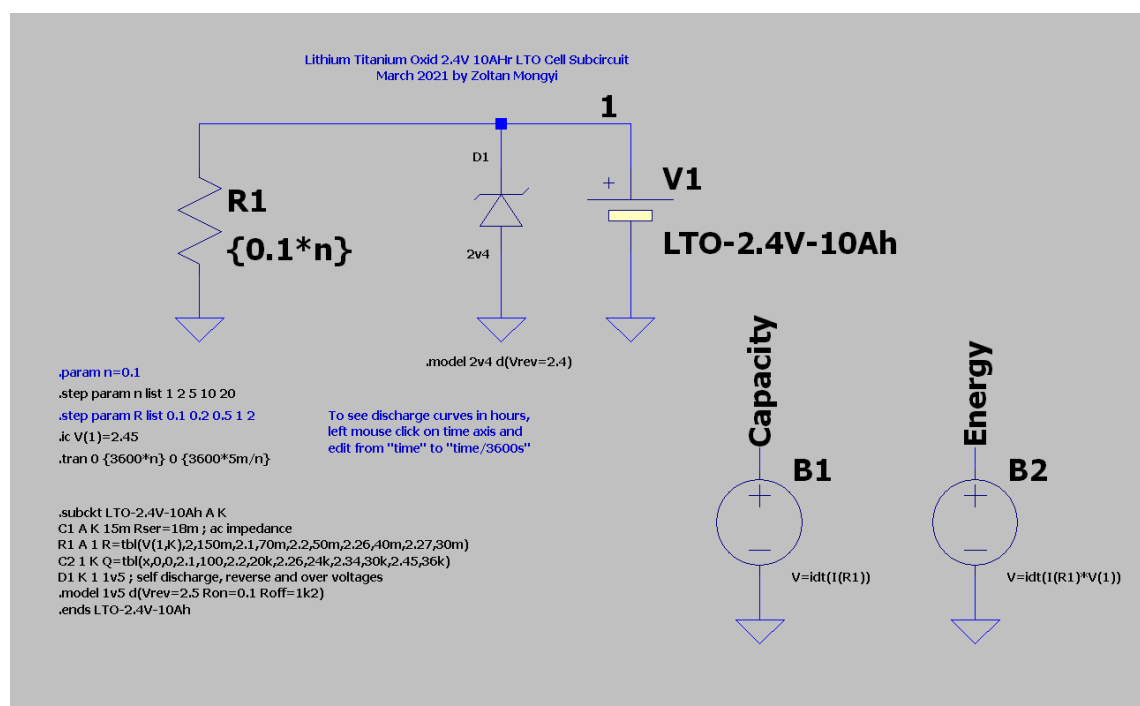


10. ábra: Az alapul vett NiMH akkumulátor modellje

Ezután az így kapott cella modellt validáltam, úgy, hogy a cella töltési ideje és kisütési ideje, feszültség szintjei, a cella által szolgáltatott teljesítmény és energia megfelel-e a valóságban mért értékeknek. A kapacitás és az energia méréséhez az LTSpice-ban elérhető idő szerinti integrálást megvalósító *idt()* függvényt használtam.

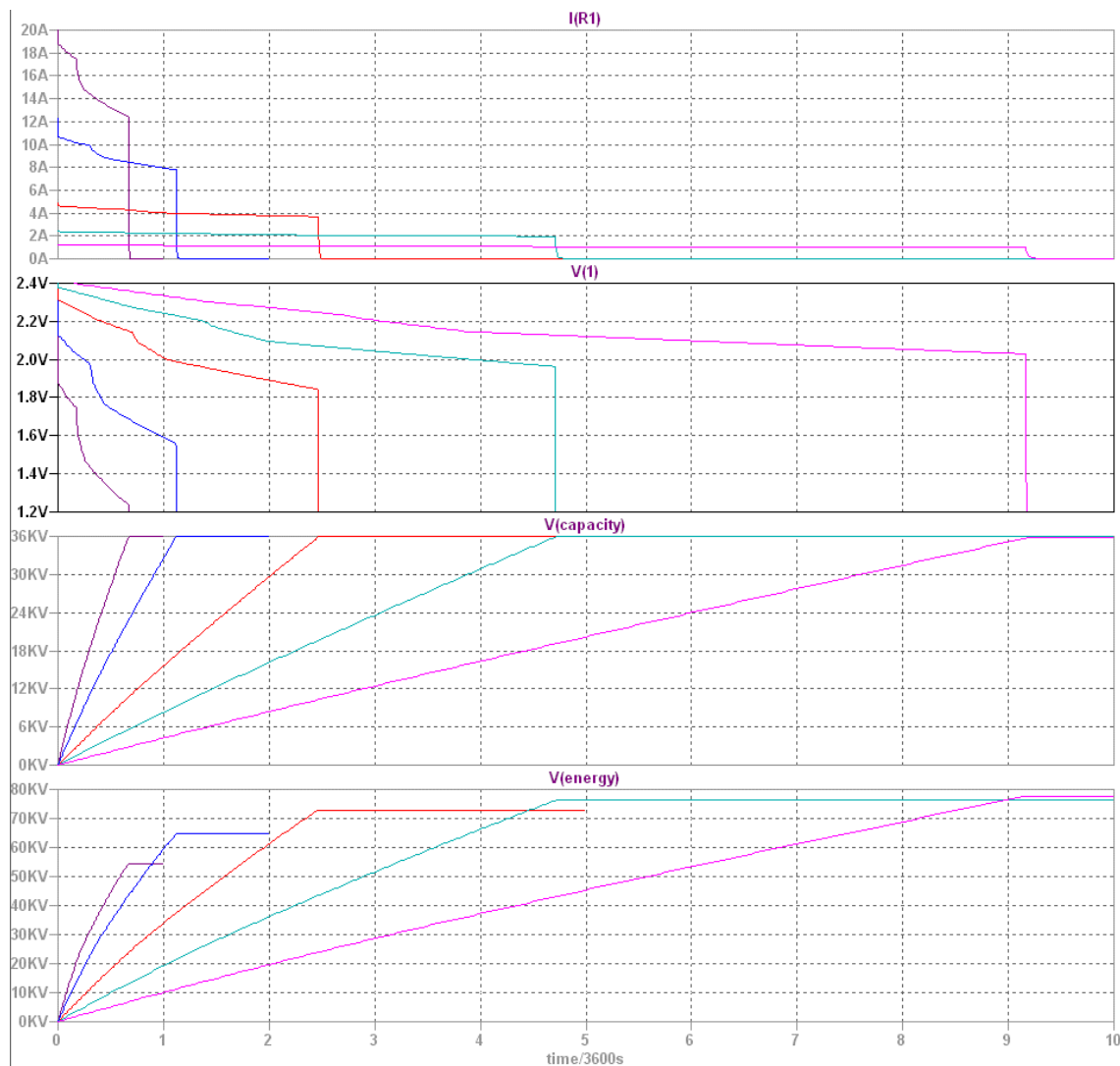
Kisütés során az áramot integrálva az idő szerint az akkumulátor kapacitását kapjuk eredményül, ezt a képletet adtam meg egy vezérelt feszültség forrás bemeneteként, így a kimenetén az integrál értéke jelenik meg. A mértékegységeket át kell váltani, tehát annak ellenére, hogy ez egy vezérelt feszültség forrás, a kimenetén levő feszültséget amperszekundumként kell értelmezni.

Hasonlóan a cella által leadott energia is mérhető, ehhez a teljesítményt kell integrálni. A pillanatnyi teljesítmény pedig az akkumulátor feszültségének és áramának szorzata, ezt integráltam a B2 jelű vezérelt feszültségforrással az idő szerint.



11. ábra: Az elkészült LTO cella validációs elrendezése kapacitás és energia méréséhez

Az akkumulátor terhelése egy ellenállás volt, aminek az értékét a *step param* SPICE direktíva segítségével paraméterezhetővé tettem. Mivel nagyobb terhelő áram esetén az akkumulátor hamarabb lemerül így a szimuláció idejét is ennek a paraméternek a segítségével állítottam elő.



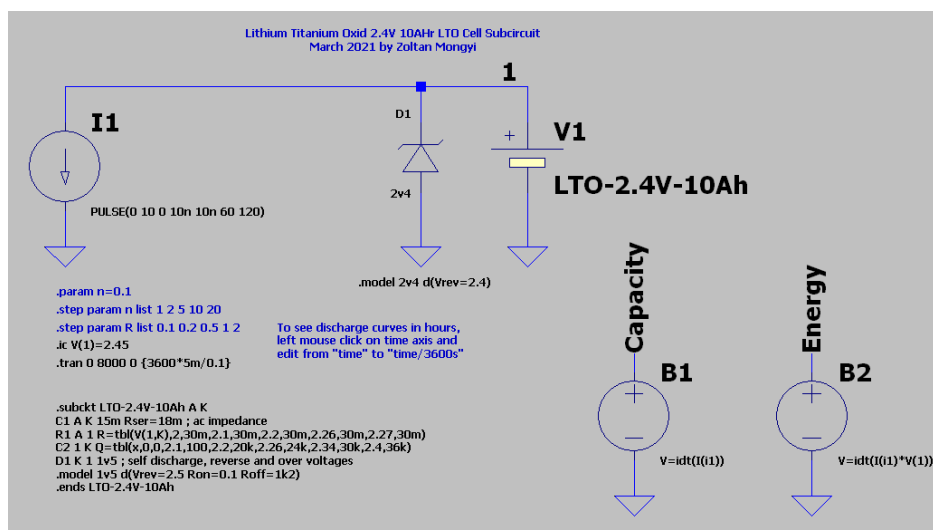
12. ábra: A feszültség, a kapacitás és a leadott energia különböző terhelések esetén

A szimuláció eredménye látható a 12.ábrán. A terhelés függvényében látható, hogy az akkumulátor kimeneti feszültsége az üresjárási feszültségről azonnal leugrik a terhelő ellenállásból és a belső ellenállásból alkotott feszültségosztónak megfelelően.

A kapacitás beállítása nagyon jól sikerült az összes esetben pontosan 10Ah mérhető a szimulációban.

Az leadott energia a terheléstől függ, ami azt mutatja, hogy minél nagyobb a terhelő áram, annál több energia disszipálódik a belső ellenálláson.

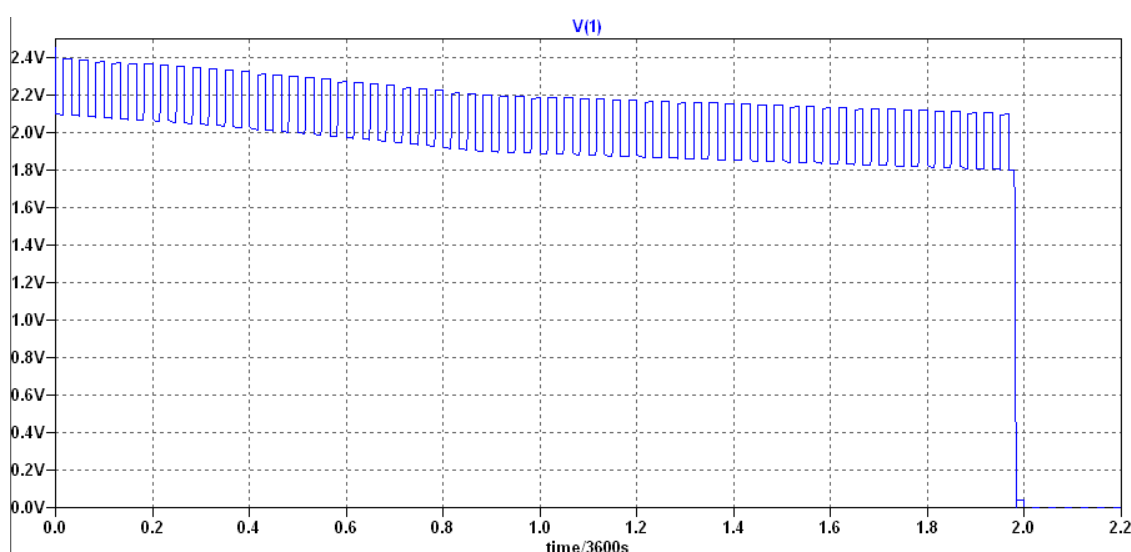
Ezután a kapcsolást módosítva a szimulált akkumulátort egy áramgenerátorral terheltem. Az áramgenerátorral az akkumulátor terhelésváltásra adott válaszát vizsgáltam, a terhelés 0 A és 10 A közt váltakozott percenként.



13. ábra: Az akkumulátor viselkedésének vizsgálata terhelés váltáskor

A szimuláció eredményeképpen a kapacitás ismét pontosan 10Ah lett. Az akkumulátor kimeneti feszültségének változása az, amire nagyobb figyelmet fordítottam.

Megfigyelhető, hogy az akkumulátor 7200 másodpercnél, azaz 2 óra után merül le. Ez megfelelt az elvárásaimnak, mert 1 C nagyságú, ebben az esetben 10A áramerősségű és 50%-os kitöltésű terhelés az akkumulátort 2 óra alatt kell, hogy lemerítse.



14. ábra: Az akkumulátor terhelésváltásra adott szimulációjának eredménye

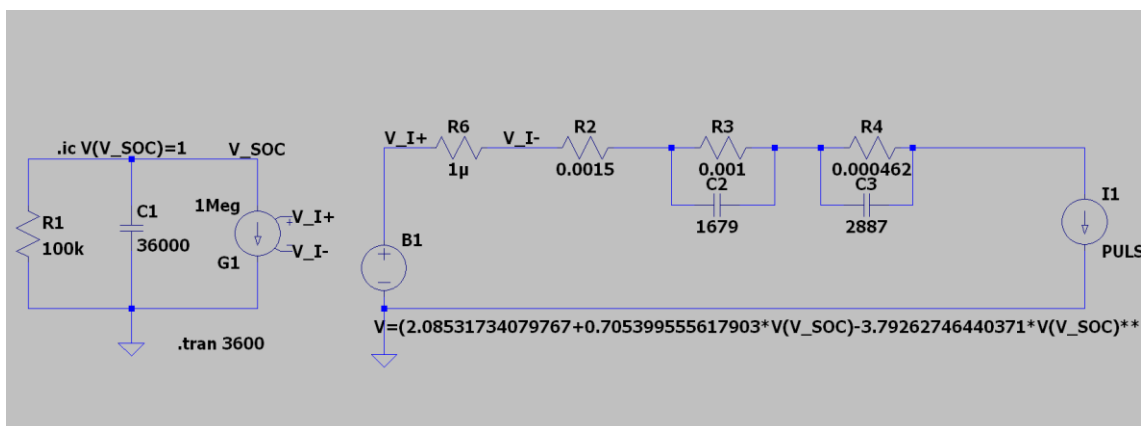
A szimulációból látszik az is, hogy a terhelés váltásra a kimeneti feszültség azonnal változik, ez viszont egy valódi akkumulátornál nem történik meg ilyen gyorsan a belső kapacitásai miatt, amit ez a modell nem vett figyelembe.

A modell másik nagy hátránya, hogy az akkumulátor belső paraméterei, az SOC vagy az üresjárási feszültség nem „mérhetőek”, nem elérhetőek közvetlenül, illetve a paraméterek nehézkesen változtathatóak, az egész töltés-feszültség görbét mindig újra kellett hangolni. Ezért a továbbiakban egy ennél összetettebb másodrendű akkumulátor modellt használtam.

6.2 Akkumulátor cella modell helyettesítő kép alapján görbe illesztéssel

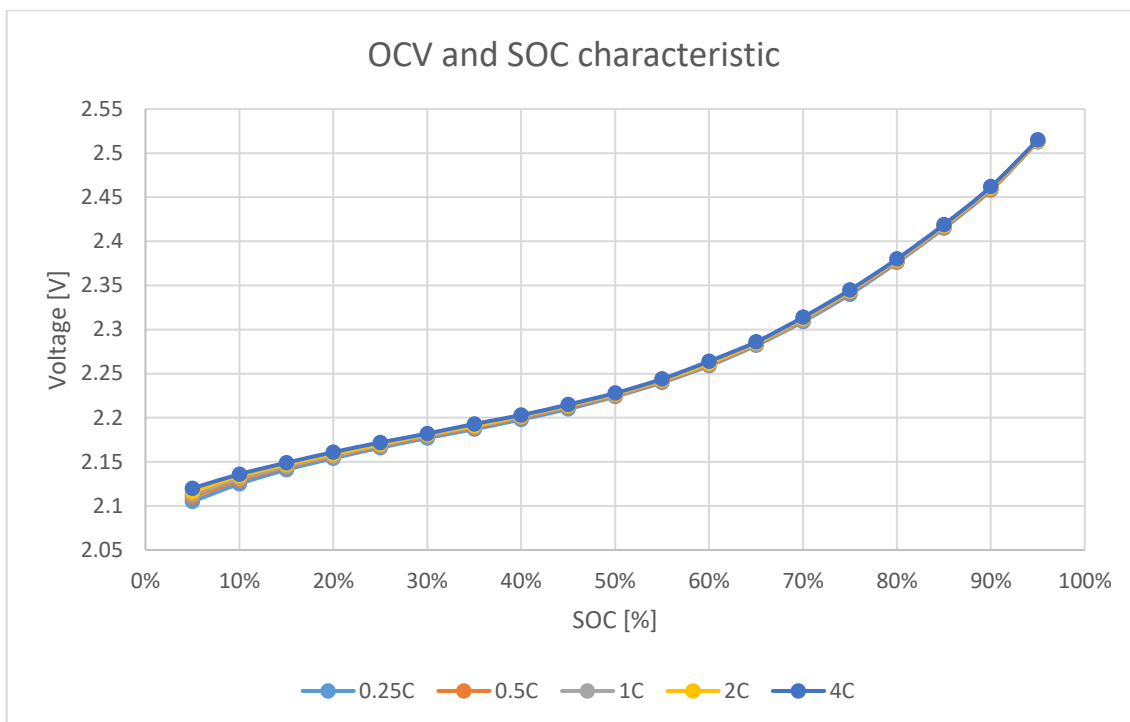
A modell a 6.ábrán szereplő több elemes Thevenin helyettesítő kép. A modellben levő a 15. ábra szerinti R2, R3, R4, C2 és C3 elemek értékeit az LTO cellára egy már meglevő modellből vettem át. [13]

A C1 kapacitás az akkumulátor kapacitásával egyenlő, értéke 10Ah-nak megfelelő. Az R1 az akkumulátor önkisülését helyettesíti, akár el is hagyható. A G1 áramgenerátor az R6 ellenálláson átfolyó áramot hajtja át a C1 kapacitáson.



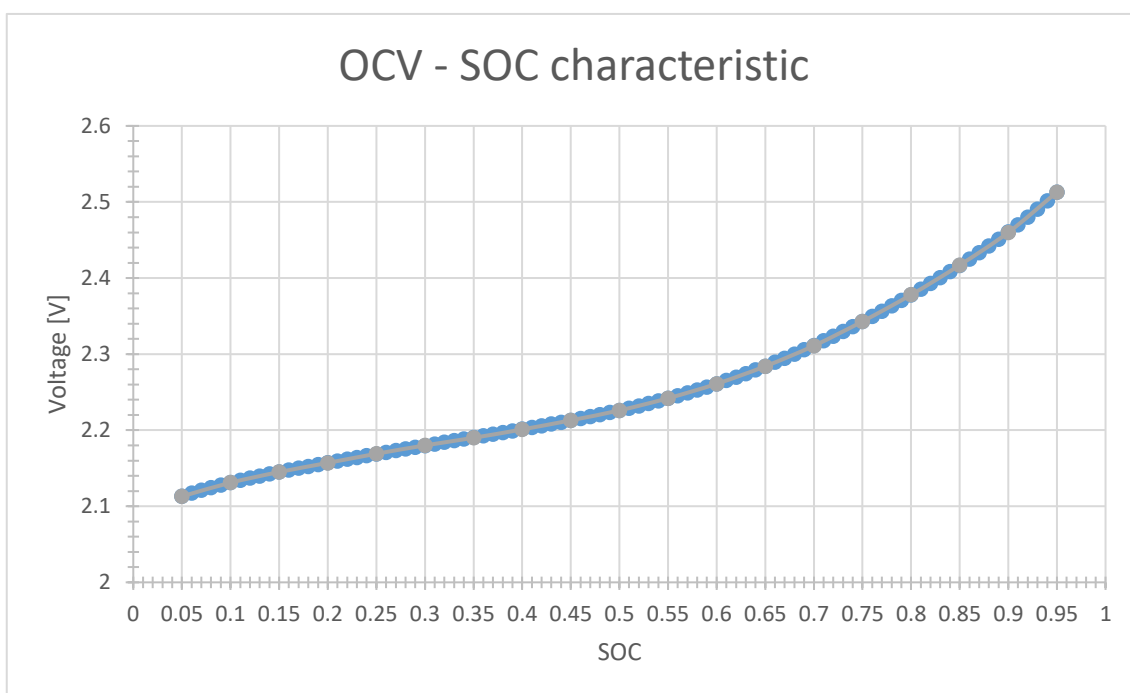
15. ábra: Az LTO cella másodrendű helyettesítő képe

A B1 feszültség vezérelt feszültségforrás az SOC-től függő üresjárási feszültséget állítja elő. Ehhez az LTO cella üresjárási feszültség és töltöttségi szint 1C terhelés melletti összefüggését vettem alapul.



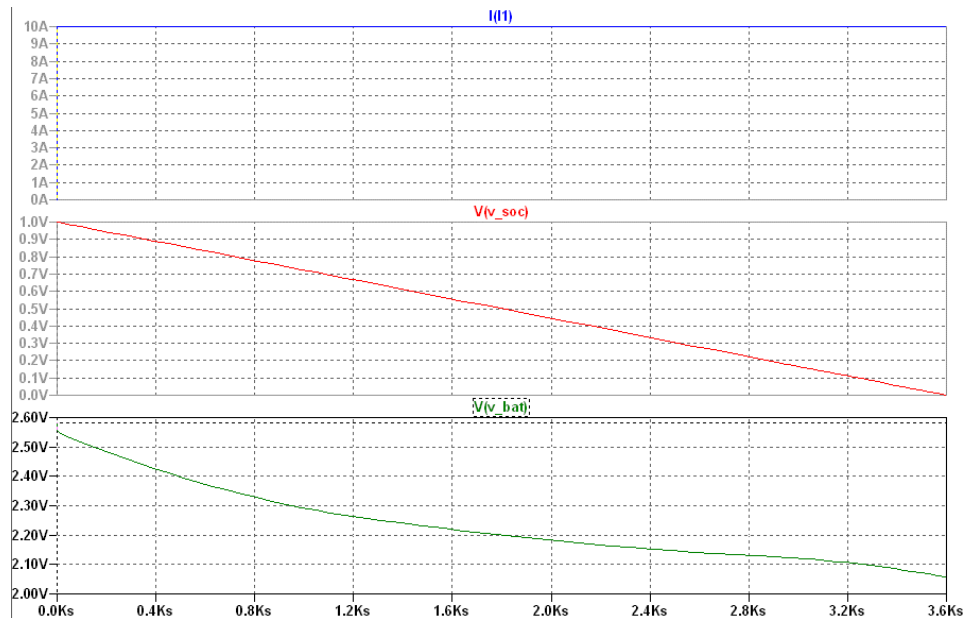
16. ábra: Az LTO cellákra jellemző üresjárási feszültség a töltöttségi szint függvényében

Az 1C fel jelölt adatokra 7ed rendű polinomot illesztettem, és ezt a polinomot használtam fel a szimulációban az üresjárási feszültség töltöttségi szintből való előállításához.



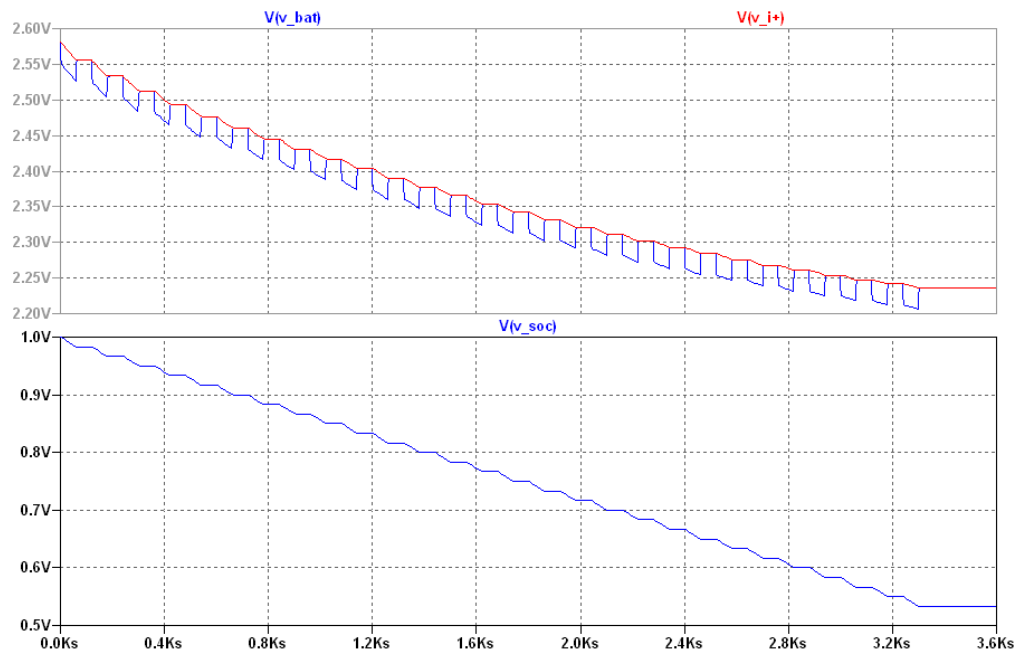
17. ábra: Az LTO karakterisztikája és az ahhoz illesztett polinom

Ezután következett a modell ellenőrzése, először a kapacitását ellenőriztem. 10A erősségű árammal terhelve a 10Ah-s akkumulátort az elvárásoknak megfelelően pontosan 1 óra alatt merült le.



18. ábra: Az LTO cella kapacitásának ellenőrzése

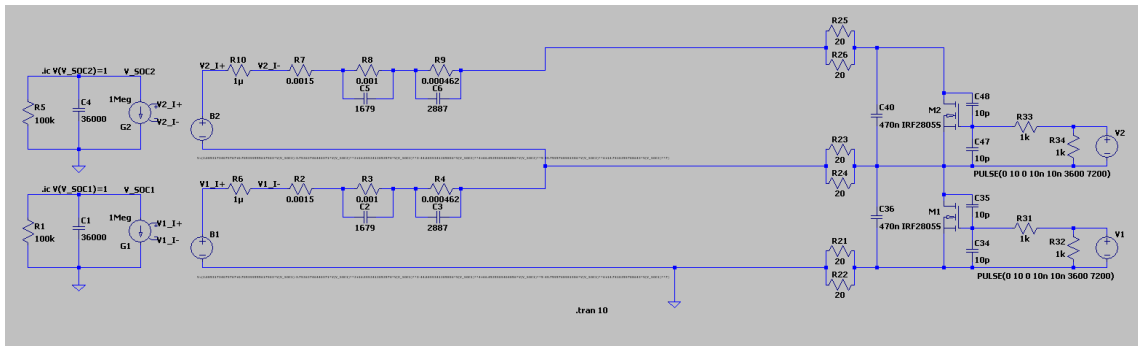
A dinamikus viselkedés teszteléséhez ugyanazt a terhelést alkalmaztam, mint az előző esetben, 1 percig 10A-es terheléssel 1 percig terhelés nélkül.



19. ábra: Az akkumulátor terhelésváltásra adott szimulációjának eredménye

A szimulációból látszik a kapacitív tagok hatása, az akkumulátor kimeneti feszültsége lassabban követi az üresjárási feszültséget. Itt megfigyelhető ennek a modellnek az az előnye, hogy közvetlenül elérhető a modellben az üresjárási feszültség. A feszültség esés a belső ellenállás és a két különböző időállandójú tag miatt van.

A modell alapjául szolgáló helyettesítő kép egyes elemek jól helyettesítik a akkumulátor belső parazita jelenségeit. Az egyes paraméterek könnyen változtathatóak, lehetővé téve az összetettebb szimuláció készítését, cellák közötti különféle paraméter eltérések létrehozását.

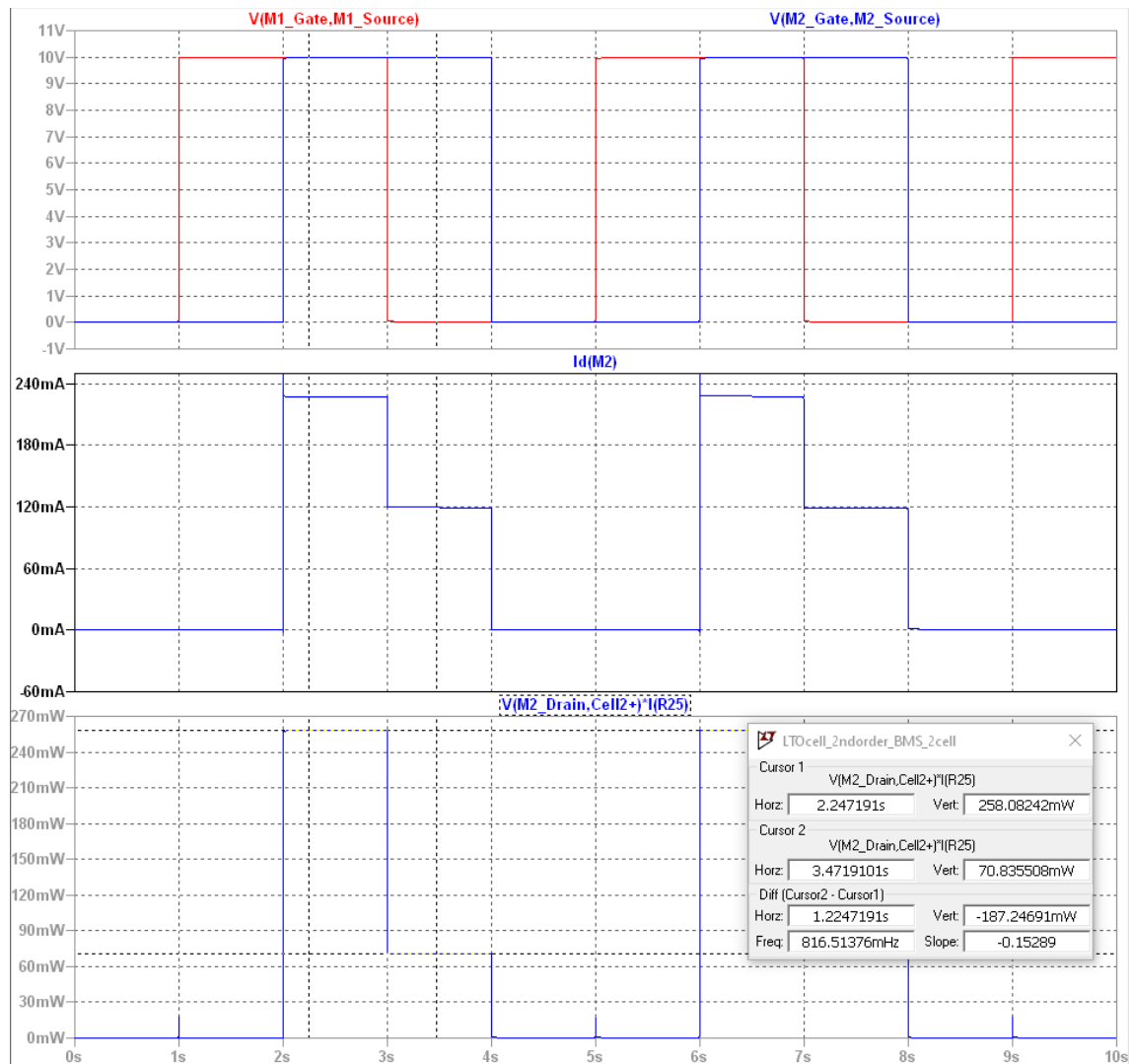


20. ábra: A BMS 2 cellás modellje

A kész cellával felépítettem a monitorozó rendszer egyszerűsített modelljét, ami egy, illetve két cellát tartalmazott, két cella együttes kisütésekor az áram nem haladhatja meg a BQ79616 által előírt 240 mA-t. Az ellenállás értéke két cella feszültségéből könnyen kiszámolható. Azért így, mert egyszerre két egymás melletti cella passzív kiegyenlítése történhet két szomszédos FET bekapcsolása esetén.

$$R_{CB} \approx \frac{2 \times U_{C,max}}{I_{CB,max}}$$

Ahol $I_{CB,max} = 240 \text{ mA}$, $U_{C,max} = 2,6 \text{ V}$, ez alapján két darab 20 ohmos ellenállást használtam párhuzamosan kapcsolva. A következő szimulációban egy ilyen esetet vizsgáltam, úgy, hogy a cellát két-két 20 ohmos ellenálláson és a FET 1 ohmos $R_{DS,on}$ ellenállásán keresztül sűtöttem ki.



21. ábra: Az ellenállások disszipációja 1 cella, illetve 2 szomszédos cellakiegyenlítése közben

A szimuláció alapján az ellenállások maximális teljesítménye 258 mW-ra adódott két szomszédos cella kiegyenlítése közben, ha a páratlan és a páros cellákat külön-külön egyenlítjük ki, akkor 1 cella esetén az ellenállásoknak 70mW teljesítményt kell disszipálniuk, a standard 1206-os méretű ellenállások tartósan is képesek 250mW disszipálására, ezért az első minta felépítéséhez ilyen ellenállásokat választottam.

7 Kapcsolási rajz elkészítése

A kapcsolási rajzot a Knorr-Bremse szériafejlesztéseihez is használt Zuken által készített CADStar 17.0 nevű program segítségével készítettem el.

Fontos megjegyezni, hogy a cégnél a felhasznált alkatrészeket egy központi könyvtárban kezeljük. A minőségbiztosítás miatt, ezt a könyvtárat egy erre kijelölt csapat kezeli. Így, ha egy alkatrész még nincs benne, akkor tőlük kell azt megigényelni, illetve lehetőség szerint biztosítani a hozzá elérhető információkat, adatlapokat és modelleket a munkájukat ezzel is egyszerűbbé téve. Ezután egy csapattag felveszi az adott alkatrészt, és egy másik pedig jóváhagyja, valamint értelemszerűen én is minden esetben ellenőriztem, hogy az így a könyvtárba bekerült alkatrész megfelel-e az adatlapban foglaltaknak. Ez a folyamat bizonyos esetekben, főként standard lábkiosztásoknál gyors, de egyedi alkatrészeknél, pl. csatlakozóknál elhúzódhat, mivel teljesen új modellt kell hozzá létrehozni. Tehát érdemes az összes szükséges alkatrészt a kapcsolási rajz megkezdése előtt megigényelni. Ha valami még így is hiányzott pl. csatlakozó, akkor annak helyettesítésére egy lehetőleg azonos lábkiosztású alkatrészt vettem fel a kapcsolási rajzba és később cseréltem le az új alkatrésze.

Ez főként a 22 pines csatlakozónál okozott problémát, amely már a nyomtatott áramkör rajzolása során készült el, és mivel meglehetősen hosszú ez az alkatrész, ezért az addig meglevő layout körülbelül felét újra kellett rajzolnom.

A kapcsolási rajzot a blokkvázlat alapján választottam szét egy fölapra és egységenként külön oldalakra.

7.1 Főoldal

A kapcsolási rajz főoldalán könnyedén áttekinthetjük a kapcsolás fő elemeit, az elrendezés szinte a blokkvázlatot tükrözi. A kapcsolási rajz hierarchiája két szintből áll, a fő lap helyezkedik el a felső szinten, és hozzá kapcsolódik a rajz összes többi lapja az alsóbb szinten. Először létrehoztam a lapokat, majd a főlapon blokkokat helyeztem el, és ezeket összekapcsoltam a megfelelő alsóbb szintű lapokhoz. Ez azért nélkülözhetetlen, hogy ha a főlapon egy kapcsolatot hozzáadunk a blokkhoz akkor az megjelenjen, úgynevezett „block terminal” formájában az alsóbb lapon, illetve fordítva is igaz, ha az alsóbb lapról szeretnénk egy vonalat a főlapra, vagy a főlapon keresztül egy másik lapra átvinni, akkor csak ez után az összekapcsolás után lehetséges ezen kapcsolatok létrehozása.

A főlapon ezenkívül elhelyezkedik az akkumulátor két csatlakozója, az egyik az LTO cellákhoz kapcsolódó csavarokat reprezentálja, a másik pedig a külső akkumulátor csatlakoztatására szolgál.

A tervek szerint a későbbiekben nem csak 11 cella, hanem 16 cella kezelésének lehetőségét is meg kell teremteni, és mivel a BQ79616 a legalsó cella negatív pólusáról és a legfelső cella pozitív pólusáról kap tápellátást, ezért ezt biztosítandó beterveztem két 0805-ös méretű áthidaló ellenállást is, melyek közül egyszerre csak a megfelelő lehet beültetve. A jelenleg elkészített variánsban értelemszerűen a 11 cellához tartozó ellenállás lesz beültetve.

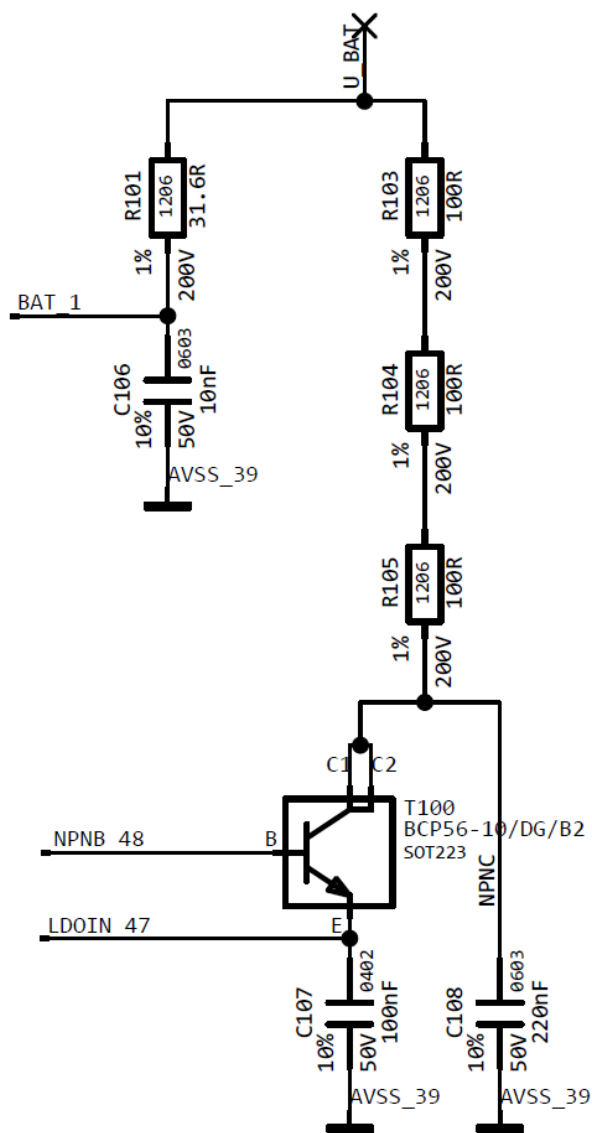
A kapcsolási rajzban lapok szerint meghatároztam azt, hogy hogyan történjen az alkatrészek számozása, százasával osztottam be a lapokon levő alkatrészek számozását, tehát a főlapon szereplő alkatrészek 1-99-ig kaphatnak számot és így tovább a többi lapon is egészen a 400-499 tartományig.

7.2 BQ79616 és a tápellátásához tartozó kiegészítő elemek

Az akkumulátor monitorozó és kiegyenlítő integrált áramkör köré épül a kapcsolás. A vezérlő saját magának állítja elő a tápfeszültségeit az akkumulátor feszültségéből, ehhez azonban szükség van egy külső NPN tranzisztorra, ellenállásokra és kondenzátorokra. A tápellátást a chip közvetlen az akkumulátorból veszi. Két fő része van.

A BAT pinen keresztül azok az alacsony fogyasztású részek kerülnek megtáplálásra, amelyek a vezérlő minden állapotában működnek.

A másik ágon az NPN tranzisztor segítségével az LDOIN pinen 6V-os feszültséget állít elő. Ez a pin a bemenete a további belső Low Drop Out regulátoroknak.



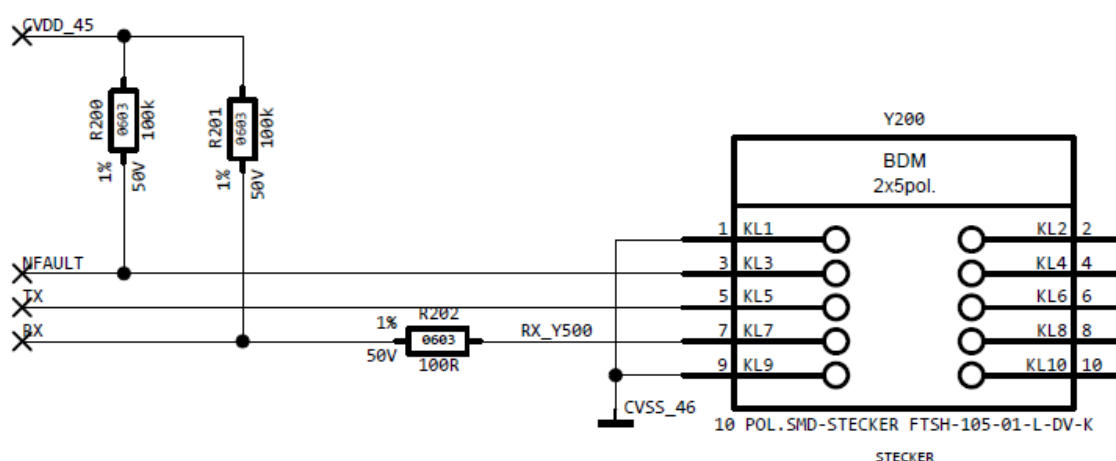
22. ábra: A BQ79616 tápellátása

7.3 Kommunikáció

A kommunikációhoz tartozó lap tartalmazza a differenciális kommunikációhoz tartozó alkatrészeket és az UART kommunikációhoz tartozó blokkot. Az UART kommunikáció, az RX és TX vonalakon kívül, mindkét esetben kiegészül egy hiba jelzésre szolgáló, alacsony aktív kimenettel, az NFAULT jellel is.

Az UART kommunikációhoz kétféle megoldás is implementálható beültetéstől függően. A jelenlegi verzió a normál galvanikusan csatolt megoldást tartalmazza, de lehetőség van leválasztott UART kommunikáció kialakítására is. Mindkét kialakítás egy közös Y200 jelölésű csatlakozón érhető el, a csatlakozó egyik oldalán a galvanikusan csatolt interfész található, a másik oldalán pedig a leválasztott UART interfészhez lehet csatlakozni.

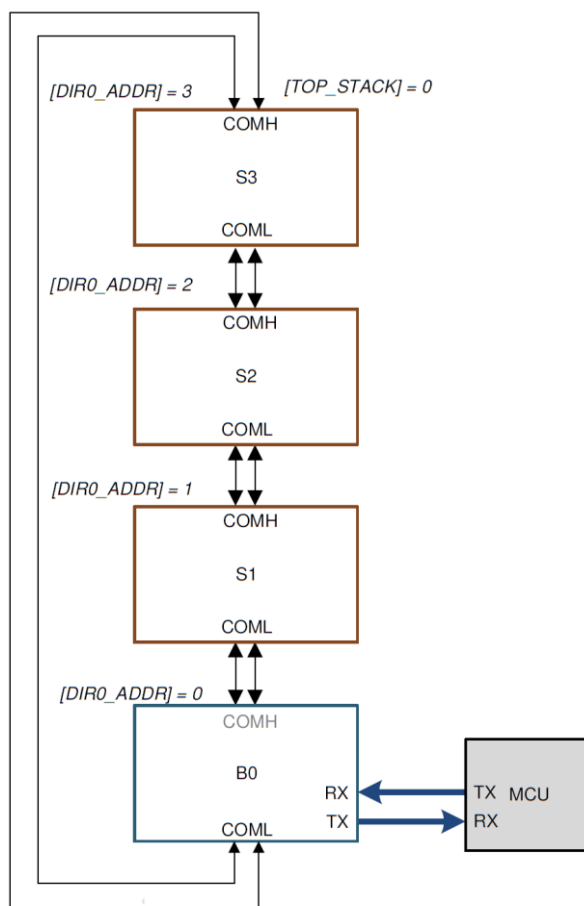
A galvanikusan csatolt verziónál a hibajelző kimenet egy felhúzó ellenállással kapcsolódik a kommunikáció tápellátásáért felelős CVDD vonalhoz, így biztosítva azt, hogy nem lehet a nyitott kollektoros kimenet véletlenül alacsony szintű, csak akkor, amikor a kimenet aktív. Az RX UART bemenethez egy áramkorlátozó bemeneti ellenállást és egy felhúzó ellenállást implementáltam. A felhúzó ellenállás biztosítja, hogy ha nincs kommunikáció, akkor a bemeneten ne lépjen fel véletlenszerű jelszintváltás. A kimenetre nem tettem ellenállást. A kommunikációs interfész megfelelő működéséhez a kontroller felőli oldalhoz tartozó RX és TX pinek ugyanilyen kialakítása szükséges.



23. ábra: Nem leválasztott UART interfész

52

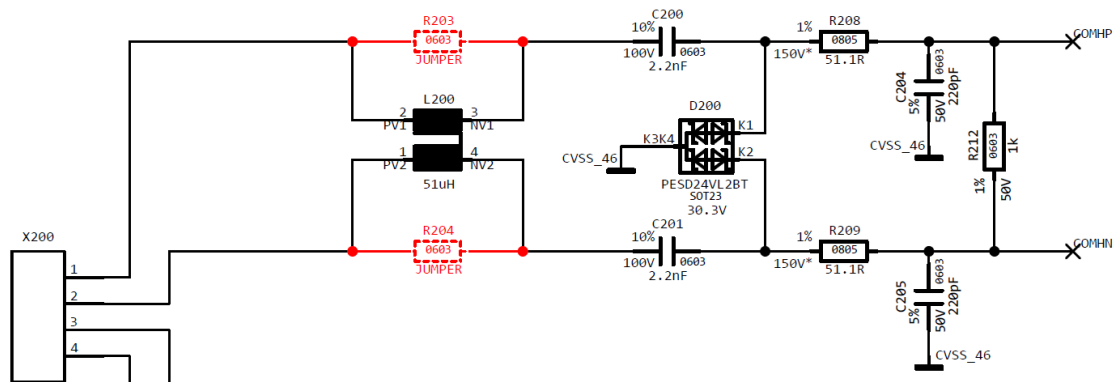
A fő kommunikációs vonal a kettő kétirányú, differenciális kommunikáció, két-két vonalon keresztül (COMHP, COMHN, valamint COMLP és COMLN). Ezzel az akkumulátor monitorozó egységeket és a mikrokontroller egységét egy gyűrű elrendezésű hálózatba lehet kötni, ez azért jó, mert így, ha egy helyen elszakad a vezeték, akkor a kommunikációs lánc továbbra sem szakad meg, hanem a kontroller felől nézve gyűrű helyett két ágra oszlik.



25. ábra: Sematikus ábra a kommunikációs interfész gyűrű topológiájáról

A COMH interfész az adott egységből a soron következő egységhez kapcsolódik a COML interfész pedig az adott egységet a sorban megelőző modulhoz csatlakoztatja. A két irányhoz tartozó interfész egymással teljesen megegyezik. Ez egy leválasztott differenciális kommunikáció, azért, mert az egyes akkupakkok között feszültségszint különbség lehetséges. A leválasztásnak három módja lehetséges. Ha azonos nyomtatott áramkörön több BQ79616 kommunikál egymással, vagy a környezet nem zajos és nem kell hosszú kábelezés, akkor elég kapacitív leválasztást alkalmazni a mikrochipek között. Ha nagy feszültség különbség van például egy 400V-os akkupakk legfelső

akkumulátorpakkja és a vezérlő egység között, akkor transzformátoros leválasztás kiépítése ajánlott. Én a harmadik módszert használtam, mivel nem lesz magas feszültségű az akkumulátorpakk, a kapacitív leválasztást egy közös módusú szűrő tekercssel egészítettem ki az EMC zavarhatások csökkentése érdekében, opcionálisan ez a tekercs kihagyható két áthidaló ellenállás segítségével. Az ESD dióda az áramkör belső részeit védi meg a külső elektrosztatikus kisülésektől. Minden vonalra 50 ohmos szűrő, illetve impedanciaillesztő lezáró ellenállást tettem.



26. ábra: Differenciális kommunikációs interfész

7.4 Hőmérséklet érzékelő bemenetek

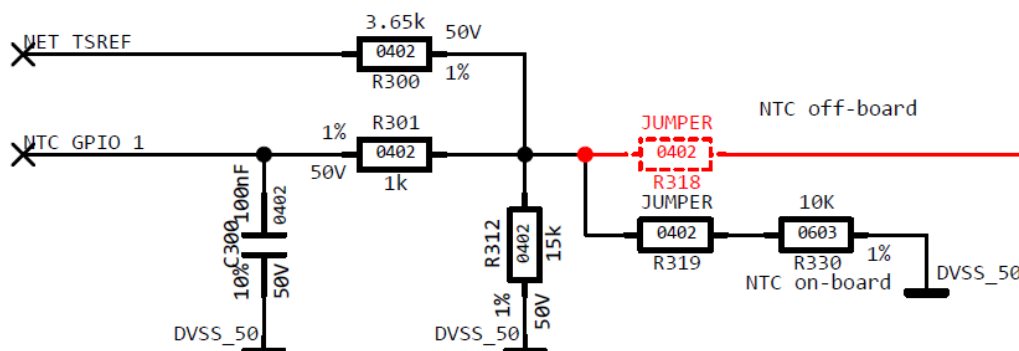
A hőmérséklet érzékeléshez 6 darab GPIO bemenetet használtam fel. Így a 11 cellás akkupakk 6 pontján lehet hőmérsékletet mérni.

Az ellenállások elhelyezhetők a tervezett nyomtatott áramkörön, vagy kivezetékezve felrakhatóak közvetlenül az akkumulátorcellákra is, ehhez az áthidaló ellenállásokat kell a megfelelő pozícióba tenni. Az első verzióban a nyomtatott áramkörön elhelyezett ellenállásokkal fogjuk a hőmérséklet mérést tesztelni.

A hőmérséklet érzékelő ellenállás névleges értéke szobahőmérsékleten $10\text{ k}\Omega$, a vele párhuzamosan kapcsolt $15\text{ k}\Omega$ -os ellenállással a közös eredőjük $6\text{ k}\Omega$. Ez a kapcsolás a $3.65\text{ k}\Omega$ -os ellenállással együtt $6\text{ k}\Omega / (6\text{ k}\Omega + 3.65\text{ k}\Omega) \approx 0.622$ osztásarányt ad a bemeneten, ami 3.1 V -os névleges szobahőmérsékletű feszültséget jelent.

A TSREF egy 5 V -os referencia feszültség, ami direkt a hőmérséklet érzékelő NTC ellenállások előfeszítésére szolgál.

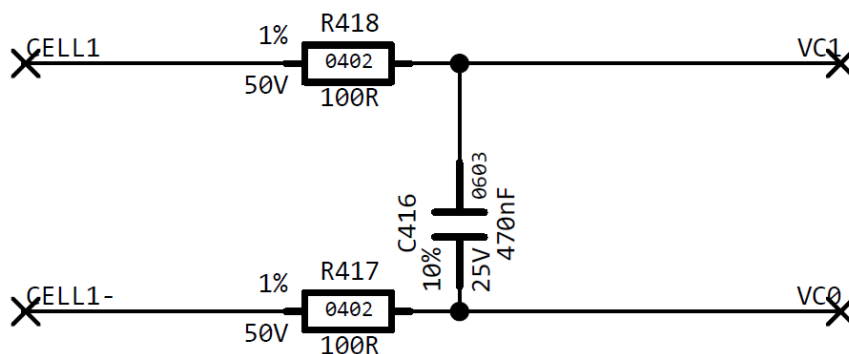
A bemenetre aluláteresztő 100 nF -os kondenzátorból és $1\text{ k}\Omega$ -os ellenállásból alkotott RC-szűrőt terveztem.



27. ábra: Hőmérséklet érzékelő áramkör

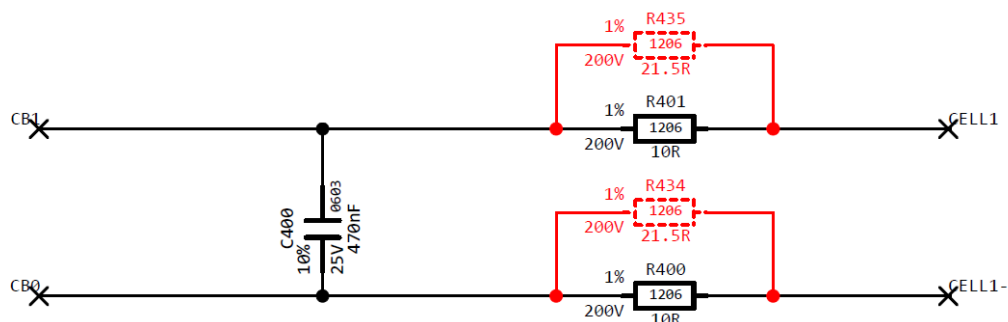
7.5 Akkumulátorhoz kapcsolódó szűrők és kiegyenlítő ellenállások

A feszültség érzékelő bemenetekhez tartozó aluláteresztő szűrőket 100 ohmos ellenállásokból és 470 nF-os kondenzátorokból valósítottam meg. Kis méretű 50 V-os ellenállásokat választottam, mert nincsen rajta sem nagy feszültség esés, sem nagy disszipáció. A kondenzátorra szintén csak egy cellányi feszültség esik, így ide is elég a 25 V-os kondenzátor, ez 0603-as tokozású.



28. ábra: A feszültségmérő bemenetek kialakítása

A kiegyenlítéshez 10 ohm értékű ellenállások lennének megfelelőek, de akkor az egy ellenállásra eső teljesítmény 500mW körüli lenne. Mivel az áramkörön sok hely áll rendelkezésre, ezért és a várható nagy disszipáció miatt 1206-os méretű ellenállásokat választottam, és egy darab 10 ohmos értékű helyett kettő 21.5 ohm ellenállásút választottam, amivel az egy ellenállásra jutó teljesítmény legrosszabb esetben 258mW, ezáltal nem kell speciális nagy teljesítményű ellenállásokat használni. A 200 V-os maximális feszültségre itt sem kell számítani, de ehhez a tokozáshoz ez a feszültségtűrés tartozik.



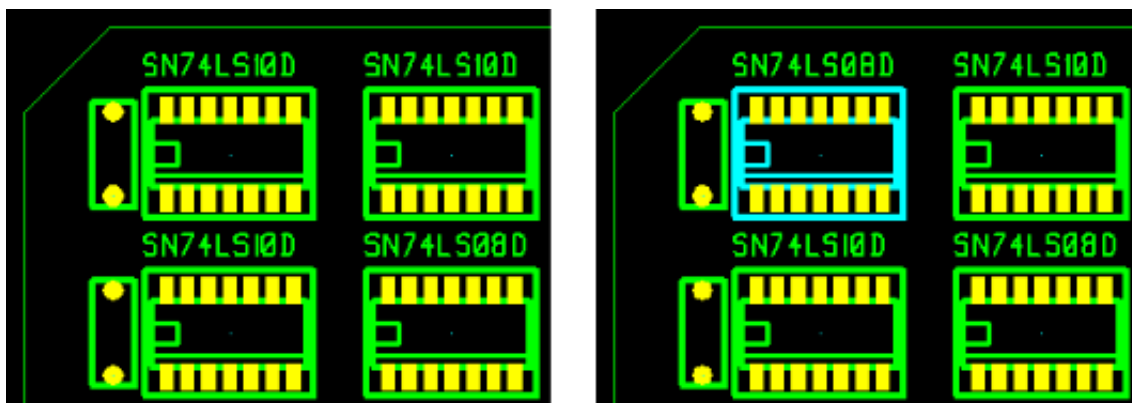
29. ábra: A cellakiegyenlítő ellenállások

7.6 Beültetési variánsok kezelése

Miután minden alkatrészt megrajoltam a kapcsolási rajzon, elkészült az úgynevezett „master” variáns, ami minden alkatrészt tartalmaz, ez kellett ahhoz, hogy a nyomtatott áramkört megrajzolhassam. A kapcsolási rajzon ezután létrehoztam egy második variánst, ami már csak a ténylegesen egyszerre beültetendő alkatrészeket tartalmazza. Ez azért szükséges hiszen több helyen alkalmaztam olyan megoldást, ami nem szükséges minden mintához, illetve van, ahol két alkatrész nem lehet egyszerre beültetve, de így egy nyomtatott áramkör később több különféle beültetési variánssal több alkalmazáshoz is testre szabható. Tehát az azonos nyomtatott áramkörön létrehozott különböző variánsok rézrajzolatai teljesen megegyeznek egymással, másszóval az alkatrész láb kiosztásoknak az alakjainak, a méreteinek, a huzalozásnak és a rézfelületeknek teljesen egyformának kell lenniük. Ez szériagyártásnál a költségeket is csökkenti, hiszen a PCB gyártónak elég egyfajta PCB-t gyártania, nem kell minden variánshoz más-más szerszámkészletet gyártania, illetve a beültetésnél sem kell külön stencileket alkalmazni a pasztázás során.

A variánsokban nem csak azt adhatjuk meg, hogy egy alkatrészt be kell-e ültetni vagy nem, hanem azt is, hogyha egy adott alkatrész helyére az adott variánsban egy láb kiosztásban kompatibilis, de másik alkatrészt szeretnénk használni.

Az így létrejött variáns alapján könnyen generálható volt egy olyan „Bill-of-Materials” táblázat, amely már csak a beültetendő alkatrészeket tartalmazza.



30. ábra: Példa az azonos láb kiosztású de eltérő alkatrészekre

8 Nyomtatott áramköri rajz elkészítése

A kapcsolási rajz elkészülése után a nyomtatott áramkör megrajzolása következett. Sajnos a munkám során eddig nem használtam a CADStar nyomtatott áramkör tervező részét, mert a csoporton belül van külön ezzel foglalkozó nyomtatott áramkör tervező részleg. Ezért a félév során el kellett sajátítanom ennek a programrésznek a használatát is, szerencsére az ebben nálam sokkal jártasabb kollégák mindig készséggel segítettek, amikor megkerestem őket a kérdéseimmel.

A nyomtatott áramkör megrajzolásának első fázisa a körvonal definiálása volt. A körvonalat az akkumulátort is tartalmazó doboz tervezéséért felelős gépészmérnök kollégám rajzolta meg egy CAD-es programban, majd ezt kiexportálta számomra. A két szoftver között az exportálás és a beimportálás során egy vektoros, 2 és 3 dimenziós rajzok leírására készült fájlformátumot a .dxf-et használtam (Drawing eXchange Format DXF), azonban ennek ellenére, sem volt zökkenőmentes. A CADstarban először egy konfigurációs fájlt kellett létrehozni, ami tartalmazza, hogy az importált dxf fájl a PCB melyik rétegére kerüljön, itt kellett definiálni, hogy a beimportált fájl a nyomtatott áramkör körvonalát tartalmazza.

Ezután hozzáadtam az alkatrészeket a nyomtatott áramköri rajzhoz a kapcsolási rajzból. Ekkor természetesen nem csak az alkatrészek kerülnek át, hanem a köztük létrehozott kapcsolatok is.

Fontos szempont volt a tervezés során, hogy minél olcsóbb legyen a későbbi szériagyártás, ezért az összes alkatrészt a felső oldalra kellett elhelyeznem. Ez kissé megbonyolította az alkatrészek elhelyezését és összekötésüket, de szerencsére bőven volt hely ahová elhelyezhettem őket.

A tervezés során szem előtt tartottam a Texas által adott adatlapban található nyomtatott áramkör kialakításához kapcsolódó ajánlásokat. Ez főleg a kommunikációs rész megrajzolásánál és a földelés kialakításánál volt fontos.

A vezetékezésnél kihasználtam, hogy sok hely áll rendelkezésemre, így a huzalozás minimális szélességét 0.3 mm-re választottam. Ahol nagyobb áramok folyhatnak, például tápvonalakon és a cella kiegyenlítő vonalakon ott 0.5 mm széles vezetékeket használtam.

8.1 A tápellátás kialakítása

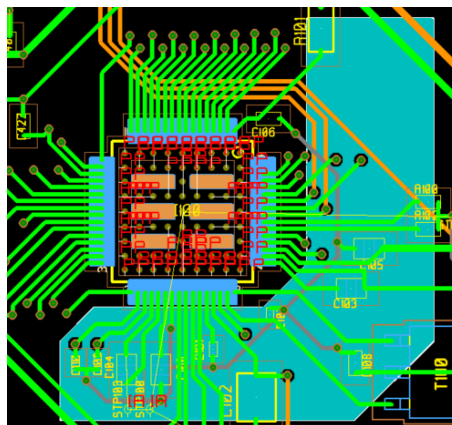
A BQ79616 tápellátása az akkumulátorról történik. Annak érdekében, hogy a cellafeszültség mérést ne befolyásolja a mikrochip áramfelvétele, a tápvezetékét már az akkumulátor csatlakozási ponttól külön vezetékkel kötöttem be. Így az ezen folyó áram miatt a vezetéken levő feszültségesés nem torzítja el a legfelső cella feszültségmérését. Erre odafigyeltem a 11 cellás és a 16 cellás kialakításnál is.

A vezérlő minden tápvonalára kondenzátorokat tettem, úgy, hogy azok minél közelebb legyenek a mikrochiphez. Általánosságban azért célszerű a tápszűrő kondenzátort az integrált áramkörhöz minél közelebb tenni, hogy csökkentsük a hozzávezetések parazita induktivitását és ellenállását.

Az akkumulátormonitorozó áramkört a panel közepén helyeztem el, hogy lehetőleg mindegyik akkumulátor cella bekötési ponthoz közel legyen.

A nyomtatott áramkörhöz 4 rétegű panelt választottam. A legfelső rétegen helyezkedik el az összes alkatrész. A második rétegen kizárólag föld kitöltések vannak, a földkitöltés csökkenti az áram visszaújának impedanciáját, így minimális feszültség esik rajta. A harmadik réteget megtartottam a tápvezetékek számára, és itt vezettem be a vezérlőbe a hőmérséklet érzékeléshez használt GPIO vonalakat. A legalsó réteget huzalozási réteggé használtam, hogy a felső rétegen, minél optimálisabban tudjam elhelyezni az alkatrészeket.

A különböző földekhez tartozó alkatrész csoportokat úgy helyeztem el, hogy az azonos földre csatlakozó alkatrészek lehetőleg egy területen legyenek. Így a második rétegen egyszerű kitöltésekkel tudtam dolgozni. A tápellátáshoz kapcsolódó alkatrészekhez, pl. tápszűrő kondenzátorokhoz az AVSS-el jelölt analóg föld tartozik.

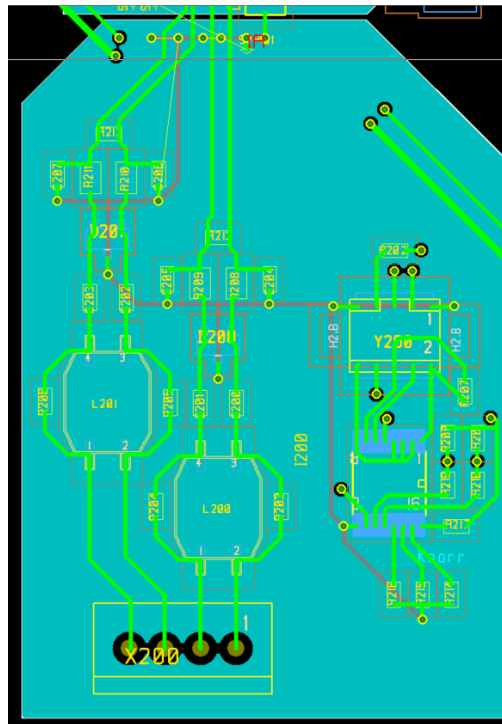


31. ábra: A BQ79616 és a körülötte L-alakban levő AVSS kitöltés

8.2 Kommunikációhoz tartozó alkatrészek elhelyezése

A kommunikációs interfész kialakításánál követtem az adatlapban adott javaslatokat. A „daisy chain” differenciális kommunikációhoz tartozó vezetékeket a lehető legegyszerűsre hagytam, ehhez illesztettem az alkatrészek elhelyezését is. Az alkatrészek alá teljes földkitöltést tettem, ez a kommunikációhoz tartozó földkitöltés a CVSS vonalhoz kapcsolódik.

A csatlakozó egy négy érintkezős furatszerelt alkatrész, amelyet a kontroller kártyát tervező kollégákkal közösen választottunk. Ugyanezt a csatlakozót használtam az NTC ellenállások kivezetésére, amennyiben nem a panelen, hanem az akkumulátoron kerülnek elhelyezésre.

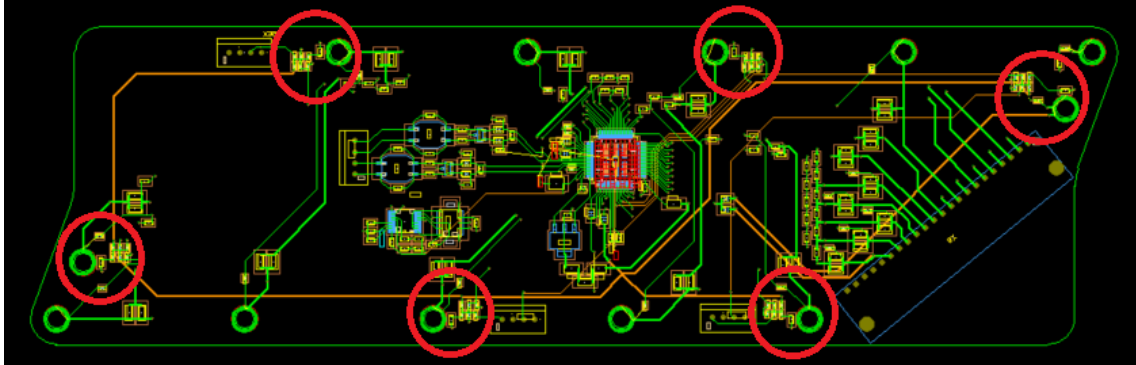


32. ábra: Balra a daisy chain interfész két vonala, jobbra az UART interfész

Az UART kommunikációnál a leválasztásért felelős rész került távolabb a vezérlőtől, mert ez alapvetően nem lesz beültetve, a normál UART vezetékek így a vezérlőtől egyenesen a csatlakozóig futnak az alsó oldalon.

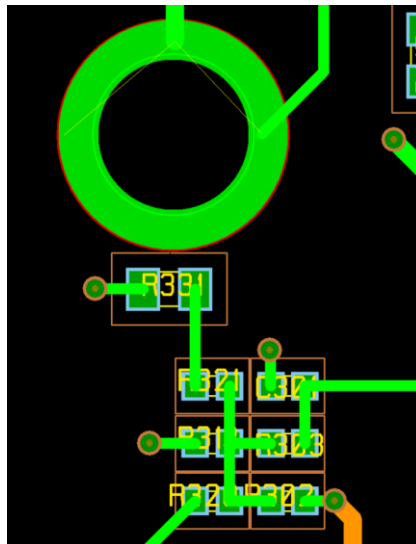
8.3 Hőmérsékletméréshez tartozó alkatrészek

A 6 darab hőmérséklet érzékelési pontot a 12 akkumulátor csatlakozási pont között egyenletesen osztottam el az alábbi ábrán piros körökkel jelzett módon.



33. ábra: A hőmérséklet méréshez használt áramkörök elhelyezése a panelen

Az egyes pontokon belül az NTC ellenállást a lehető legközelebb helyeztem el a csatlakozási ponthoz, úgy, hogy a csavarfej szélétől 2 mm távolságban legyen. Az általános szabály a vállalatnál az, hogy az elektronikus alkatrészek és a fém alkatrészek között 2mm távolságnak kell lennie, elektromos alkatrészek és nem fém alkatrész között 1 mm távolságot kell tartani. A hőmérséklet érzékelés többi elemét egymáshoz közel a panel szélén helyeztem el egy blokkban.



34. ábra: A hőmérséklet érzékelés alkatrészeinek elhelyezése

Az NTC áramkörökhöz a belső föld és táp rétegekben körben a panel szélén U-alak-ban alakítottam ki a táp és föld vonalakat.

8.4 Az akkumulátor kiegyenlítéshez és feszültség méréshez tartozó elemek elrendezése

Az akkumulátor csatlakozási pontjaitól elkülönített vonalakon vezettem a kiegyenlítéshez tartozó vezetékeket a feszültség mérő vezetékektől, hogy a kiegyenlítő áram által okozott feszültségesés ne befolyásolja a feszültségmérést.

A legnagyobb kihívást a 22 érintkezős csatlakozó elhelyezése okozta, a projektvezetés kérése volt, hogy ugyanazt a csatlakozót használjam, mint ami a BQ79616-hoz vásárolt próba kártyán is megtalálható az akkumulátor cellák csatlakoztatására. Ez a csatlakozó nagyon hosszú és 90 fokos, tehát a vezetékeket oldalról kell beledugni. Ezért mindenképpen a kártya szélére akartam elhelyezni, viszont a kártya szélén sehol sem volt olyan hosszú hely ahová befért volna. Így egyetlen pozíció maradt, a panel jobb alsó részén ahová ferdén le tudtam tenni.

Ezután először a kiegyenlítő ellenállásokat helyeztem el, mint főbb áramkörü elemeket, mert cellánként 2 db 1206-os ellenállást kellett elhelyeznem. Az elhelyezés során elsődlegesen azt az célt vettem figyelembe, hogy az akkumulátormonitorozó egység a 11 cellás LTO akkumulátorra lesz felcsavarozva. Ezért az ehhez tartozó kiegyenlítő ellenállásokat a 12 csatlakozási ponthoz közel helyeztem el, ezáltal igyekeztem a PCB-n a hőelosztást egyenletessé tenni, mert így az ellenállások sem a középen levő IC-hez sem egymáshoz nem kerülnek túl közel.

Másodlagos rendezési elv az volt, hogy a tesztelési fázisban az akkumulátormonitorozó a 22 érintkezős csatlakozón keresztül is csatlakoztatható külső akkumulátor celláihoz vagy ellenállás hálózathoz is, ami az akkumulátort szimulálja. Azért, hogy a tesztelés alatt a BQ79616 mind a 16 cellabemenete használható legyen és akár egy 16 cellás akkumulátorral is tesztelhessük ezért a 12-16 vonalakhoz is beterveztem a szűréshez és kiegyenlítéshez tartozó alkatrészeket, ezeket a 12-16 cellához tartozó ellenállásokat a 22 érintkezős csatlakozóhoz közel helyeztem el. Ugyanakkor arra is figyeltem, hogy ezek a disszipáló ellenállások ne kerüljenek túl közel az NTC ellenállásokhoz, hogy ne zavarják a hőmérsékletmérést a csatlakozási pontoknál.

Ezután kialakítottam a kiegyenlítő ellenállások összeköttetéseit a cella csatlakozási pontokkal és az IC-vel, majd úgy helyeztem el a hozzájuk tartozó szűrőkondenzátorokat, hogy azok a kiegyenlítő ellenállásokhoz a lehető legközelebb legyenek.

9 Mérések

Az áramkör megrajzolása után, elkészítettem a gyártáshoz szükséges gerber fájlokat és a beültetési rajzot. A nyomtatott áramkör legyártását és beültetését külső cégektől rendeltük meg. A beültetett panelek kézhezvétele után elkezdődhetett azok tesztelése. A BQ79616 regisztereire a mikrokontrolleres vezérlőegység a DaisyChain interfészen keresztül fért hozzá. A BQ79616 kezeléséhez szükséges szoftver interfész a mikrokontroller szoftverében lett implementálva. A mikrokontrollerrel CAN-en vagy debugger-en keresztül tudtam kommunikálni.

9.1 Első kipróbálás

First power up of the PCB				
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments
☒	Check the PCB for short-circuit (at least for between the cell terminals and between U_BAT and GND)	There is no short-circuit	Passed	No short circuit detected
☒	Connect the board to U_BAT voltage		Passed	24V
☒	Check current consumption, unwanted heating		Passed	14mA
☒	Measure the LDOIN - AVSS voltage	5.9 - 6.1V	Passed	5.99V
☒	Measure the AVDD - AVSS voltage	4.85 - 5.15V	Passed	5.04V
☒	Measure the NEG5V - AVSS voltage	(-5.0) - (-4.0)V	Passed	(-4.77V)
☒	Measure the CVDD - GND voltage	4.9 - 5.1V	Passed	4.99V
☒	Measure the DVDD - GND voltage	1.65 - 1.95V	Passed	1.79V
☒	Measure the REFHP - REFHM voltage	4.975 - 5.025V	Passed	5.01V
☒	Measure the TSREF - AVSS voltage	4.9 - 5.1V	Passed	4.99V

35. ábra: Az első tápraadás eredményei

A BMS-t először vizuálisan ellenőriztem, hogy vannak-e rajta a PCB gyártásból vagy a beültetésből fakadó hibák, például forrasztási hibák, óngolyók, nem találtam semmilyen erre utaló jelet.

Második lépésben azt ellenőriztem, hogy van-e rövidzárlat a főáramköri részekben, a tápellátásban vagy az akkumulátorcella kivezetések között.

Miután nem találtam zárlatot, az akkumulátor névleges feszültségével megegyező 24V-os tápfeszültséggel próbáltam ki először a BMS áramkört. Az áramfelvétele 14mA volt, ami megfelelt BQ79616 adatlapja alapján kalkulált elvárásnak.

Ezután az integrált áramkör által előállított feszültségeket ellenőriztem egymás után, ahogyan az a 35.ábrán levő táblázatban szerepel. Minden feszültség az adatlapban megadott limitek között volt.

9.2 A DaisyChain kommunikáció tesztelése

Communication via DaisyChain				
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments
☒	Connect the BMS board to the main board via Daisy chain.		Passed	
☒	Enable daisy chain communication		Passed	
☒	Read registers via daisy chain	The register values can be read.	Passed	Registers can be read
☒	Write registers via daisy chain	The registers are writable. Should be checked with read.	Passed	Registers can be written

36. ábra: A DaisyChain kommunikáció tesztelésének eredményei

A következő lépés, azért, hogy a mikrokontrollerrel minél hamarabb kommunikálni tudjunk a BMS-sel a DaisyChain kommunikáció tesztelése volt.

A DaisyChain kommunikáció vezetékeinek csatlakoztatása és a kommunikáció engedélyezése után a BQ79616 regisztereinek olvasásával és írásával teszteltem a kommunikációt.

9.3 Cellafeszültség mérés tesztelése

Cell voltage measurement check						
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments	Internally measured Ucell [V]	Externally measured Ucell [V]
☒	Simulate the cell voltages with a power supply.		Passed			
☒	Read the voltage of cell 1, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0.001V difference	2.176	2.175
☒	Read the voltage of cell 2, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0V difference	2.164	2.164
☒	Read the voltage of cell 3, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0V difference	2.169	2.169
☒	Read the voltage of cell 4, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0.001V difference	2.179	2.178
☒	Read the voltage of cell 5, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0V difference	2.174	2.174
☒	Read the voltage of cell 6, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0V difference	2.179	2.179
☒	Read the voltage of cell 7, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0.001V difference	2.184	2.183
☒	Read the voltage of cell 8, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0.001V difference	2.19	2.189
☒	Read the voltage of cell 9, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0V difference	2.189	2.189
☒	Read the voltage of cell 10, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0.001V difference	2.207	2.206
☒	Read the voltage of cell 11, and measure the voltage externally	The difference shall be less than 0.01V	Passed	0V difference	2.2	2.2

37. ábra: A cellák feszültség mérésének tesztje tápegység segítségével

Következő lépésben a cellafeszültségek mérését teszteltem úgy, hogy a cella bemenetekre tápegységgel az LTO akkumulátor cella feszültségtartományának megfelelően 2.1- 2.2 V-ot adtam. Ezután összehasonlítottam a BMS-sel és a

multiméterrel mért feszültségeket. A különbség mindig az előzetesen elvárt 10mV-alatt volt.

9.4 Cella kiegyenlítés tesztelése

Cell balancing check							
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments	Externally measured current	Externally measured cell voltage	Internally measured cell voltage
☒	Simulate the cell voltages with a power supply		Passed				
☒	Start cell balancing, read the measured cell voltage with cell balancing		Passed				
☒	Measure the balancing current of cell 1	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.27mA	104mV	103mV
☒	Measure the balancing current of cell 2	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.27mA	103mV	102mV
☒	Measure the balancing current of cell 3	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.27mA	103mV	103mV
☒	Measure the balancing current of cell 4	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.27mA	103mV	103mV
☒	Measure the balancing current of cell 5	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.28mA	103mV	103mV
☒	Measure the balancing current of cell 6	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.28mA	103mV	103mV
☒	Measure the balancing current of cell 7	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.28mA	104mV	104mV
☒	Measure the balancing current of cell 8	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.29mA	104mV	104mV
☒	Measure the balancing current of cell 9	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.29mA	104mV	104mV
☒	Measure the balancing current of cell 10	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.3mA	104mV	105mV
☒	Measure the balancing current of cell 11	The current shall be 2.28 ± 0.02 mA. The voltage of the cell shall drop around 0V	Passed	The balancing current and the voltage drop were in the previously calculated range.	2.29mA	103mV	103mV

38. ábra: A cellakiegyenlítés tesztelése ellenállás létrával

A BMS cellakiegyenlítésének teszteléséhez a cellákat egy 1k ohmos ellenállásokból készített ellenálláslétrával helyettesítettem, a létrára 24V-os bemeneti feszültséget kapcsoltam. A kiegyenlítő áramkörök működtetésekor az elvárásnak megfelelően 104mV-os feszültségre csökkent az aktív cellakiegyenlítő bemenet feszültsége. A kiegyenlítő áram 2.28mA volt. Ez a teszt nem szimulálja a cellák teljesítményét, de hasznos azért, mert kis teljesítmény mellett ki tudtam próbálni, hogyan működik az áramkör.

Cell balancing check							
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments	Externally measured current	Externally measured cell voltage	Internally measured cell voltage
	Cell balancing check with battery cells		Passed				
...	Connect the battery stack to the PCB		Passed				
...	Start cell balancing		Passed				
☒	Measure the voltage drop of cell 1	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.6mA	2.493V	2.494V
☒	Measure the voltage drop of cell 2	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.7mA	2.493V	2.494V
☒	Measure the voltage drop of cell 3	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.7mA	2.497V	2.499V
☒	Measure the voltage drop of cell 4	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.9mA	2.496V	2.498V
☒	Measure the voltage drop of cell 5	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.9mA	2.498V	2.5V
☒	Measure the voltage drop of cell 6	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	55mA	2.496V	2.497V
☒	Measure the voltage drop of cell 7	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.9mA	2.497V	2.498V
☒	Measure the voltage drop of cell 8	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.9mA	2.497V	2.498V
☒	Measure the voltage drop of cell 9	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.6mA	2.502V	2.502V
☒	Measure the voltage drop of cell 10	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.7mA	2.497V	2.497V
☒	Measure the voltage drop of cell 11	The voltage drop shall be less than 0.01V	Passed	The voltage drop was less than 0.01V	54.5mA	2.495V	2.495V
☒	Start the balancing of 2 cells next to each other. And measure the current in the common terminal.	The balancing current on the common terminal shall change from positive direction to negative and back.	Passed	5s +54.8mA ; 5s -54.8mA The cell balancing is running on 4 cells without unwanted temperature rise.			
☒	Start the cell balancing in 4 cells.	The cell balancing shall run in 4 cells.	Passed				

39. ábra: A cellakiegyenlítés tesztelése akkumulátorcellákkal

A következő lépés a mérések során az volt, hogy a BMS-t a valós akkumulátorcellákhoz csatlakoztattam. A kiegyenlítés során először minden cella kiegyenlítő áramkör működését egyesével teszteltem. Multiméterrel mértem a cella áramát és feszültségét. Az áram 55mA körüli volt, a feszültség pedig 2.5 V körülire adódott. A multiméterrel mért feszültséget összehasonlítottam a BMS által mért értékekkel, a feszültség különbség a két mérés között mindig az elvárt 10 mV alatt volt.

A BQ79616 egyik korlátja, hogy a kiegyenlítő áramok összege nem haladhatja meg a 240 mA-t. Ez alapján egyszerre maximum 4 cella kiegyenlítése lehetséges, a 4 cella áramának összege 218 mA. A 4 cellához tartozó belső FET-eket egyszerre bekapcsolva minden hiba nélkül működött az egység.

9.5 Hőmérséklet mérés tesztelése

A hőmérséklet mérés tesztelése következett, a tesztet elvégeztem a nyomtatott áramkörre beültetett NTC ellenállásokkal és a csatlakozókon keresztül kivezetélkezett, az akkumulátorpakk különböző részein elhelyezhető NTC ellenállásokkal is.

Temperature measurement check				
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments
☒	Start temperature measurement		Passed	
☒	Measure the external temperature with another device		Passed	26.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 1	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	25.5°C
☒	Measure the temperature in GPIO 2	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26°C
☒	Measure the temperature in GPIO 3	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	27.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 4	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 5	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.4°C
☒	Measure the temperature in GPIO 6	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	25.6°C
☒	Turn on the cell balancing		Passed	
☒	Start temperature measurement		Passed	
☒	Measure the external temperature with another device		Passed	26.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 1	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.8°C The balancing currents heat the PCB and the SMD thermistor
☒	Measure the temperature in GPIO 2	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	27.1°C The balancing currents heat the PCB and the SMD thermistor
☒	Measure the temperature in GPIO 3	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	28.5°C The balancing currents heat the PCB and the SMD thermistor
☒	Measure the temperature in GPIO 4	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	27.2°C The balancing currents heat the PCB and the SMD thermistor
☒	Measure the temperature in GPIO 5	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	27.3°C The balancing currents heat the PCB and the SMD thermistor
☒	Measure the temperature in GPIO 6	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	25.8°C The balancing currents heat the PCB and the SMD thermistor

40. ábra: A hőmérséklet mérés tesztje a beültetett NTC ellenállásokkal

A hőmérséklet méréshez egy külső hőmérővel mértem meg a szobahőmérsékletet, ezután pedig összehasonlítottam az így kapott értéket a BMS által mért 6 darab értékkel.

A hőmérséklet mérés teljesítette azt a várakozást, hogy a BMS által mért értékek kevesebb mint 1°C -al tértek el a külső hőmérőhöz képest.

Ezután elindítottam a cellák kiegyenlítését és azt vártam, hogy az NTC ellenállásokon mért hőmérséklet nem fog eltérni a szobahőmérsékleten mért mérési eredményektől, de ehelyett azt tapasztaltam, hogy $0.9 - 1.3^\circ\text{C}$ -al melegebbet mértek. Ezt az eltérést a PCB melegevése okozta.

Temperature measurement check				
Checked	Measurements / Test Steps	Expected Results	Passed / Failed	Results / Issues / Comments
☒	Connect NTC thermistors to the dedicated GPIOs.		Passed	
☒	Measure the external temperature with another device		Passed	26.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 1	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 2	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.3°C
☒	Measure the temperature in GPIO 3	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.4°C
☒	Measure the temperature in GPIO 4	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.5°C
☒	Measure the temperature in GPIO 5	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.8°C
☒	Measure the temperature in GPIO 6	The measured temperature is in $\pm 1^\circ\text{C}$ range of the externally measured	Passed	26.8°C
☒	Turn on the cell balancing		Passed	
☒	Start temperature measurement		Passed	
☒	Measure the external temperature with another device		Passed	26.1°C
☒	Measure the temperature in GPIO 1	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.5°C
☒	Measure the temperature in GPIO 2	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.5°C
☒	Measure the temperature in GPIO 3	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.8°C
☒	Measure the temperature in GPIO 4	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.7°C
☒	Measure the temperature in GPIO 5	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.7°C
☒	Measure the temperature in GPIO 6	The measured temperature is the same as without cell balancing	Passed	26.5°C

41. ábra: A hőmérséklet mérés tesztje a külső NTC ellenállásokkal

A külső NTC ellenállások esetén is hasonlóan végeztem a mérést, mint az előző esetben. Az NTC ellenállásokat az akkumulátor különböző részein helyeztem el. Először a szobahőmérsékletet mértem meg és ezzel hasonlítottam össze az NTC ellenállásokkal mért eredményeket. Mind a 6 érték az elvárt maximum 1°C -os hőmérséklet különbségen belül volt.

A következő lépésben a cellák kiegyenlítése közben figyeltem meg az NTC ellenállásokkal mért hőmérsékletet. Az így mért hőmérsékletek a szobahőmérsékleti mérési eredményektől csupán $0.2 - 0.4^\circ\text{C}$ -al tértek el.

10 Összefoglalás és kitekintés

Az év során átfogó ismereteket szereztem az akkumulátorok kezeléséről és az akkumulátormonitorozás területén. Dolgozatomban ismertettem az akkumulátorok fő tulajdonságait, hogyan épülnek fel, melyek közös tulajdonságaik, és mik az egyes típusok előnyei és hátrányai.

Ismertettem a BQ79616-os akkumulátormonitorozó és kiegyenlítő integrált áramkör fő funkcióit, kiválasztásának szempontjait.

Elkészítettem az akkumulátor modelljét és a BMS egyszerűsített kiegyenlítő kapcsolását a projektben használt 11 cella helyett 2 cellára, és ezzel szimuláltam az egység működését.

Megterveztem egy akkumulátorpakk felügyeletére alkalmas vezérlő egységet. Ehhez a CADStar nevű programot használtam, melynek használatát a tervezés során szintén elsajátítottam.

Mérésekkel igazoltam, hogy a megtervezett egység működőképes.

Sok hasznos tudásra és tapasztalatra tettem szert, megismerkedhettem egy számomra új munkamódszerrel, ami eredetileg szoftverfejlesztés területén terjedt el, a csoport két vagy háromhetes úgynevezett sprintekben dolgozik, a sprint elején kitűzik az adott sprintben elérni kívánt célokat, a sprint végén pedig értékelik azokat.

Szintén ez a projekt adott lehetőséget arra, hogy az eddigi szériafejlesztési projekttől eltérően, ahol már bizonyítottan működő mintákat fejlesztünk tovább, egy teljesen új koncepciófázistól kezdődő fejlesztésben vehessek részt.

A projekt jövőjét nézve még nagyon sok tennivaló áll előttünk, a központi mikrokontrolleres vezérlő szoftverfejlesztésétől az akkumulátorcellák tesztelésén át, és az így elkészült hardver és szoftver komponensek integrálása során. Én a magam részéről a munkát az akkumulátormonitorozó rendszer következő mintafázisának tervezésével és felépítésével fogom folytatni.

A BMS áramkör következő verziója tartalmazni fog státusz LED-eket, így látható lesz, hogy mikor működik a BMS egység és mikor jelez hibát a központi vezérlő felé az NFAULT lábon keresztül.

Az aktuális verzió hiányossága, hogy voltak olyan viák, amelyek túl közel vannak az akkumulátor cella érintkezőjéhez. Ezeket távolabb kell mozgatni, hogy semmiképp ne okozzanak zárlatot, és a forrasztásgátló maszkkal el kell őket fedni.

A fejlesztők számára az is segítség lenne, ha státusz LED-ek jeleznék azt, hogy éppen melyik cella kiegyenlítése folyik.

A hőmérséklet mérő áramkörben a jumper ellenállások feleslegesek, ezért ezeket el lehet távolítani a következő verzióból.

A korlátozott irodai jelenlét az egész év folyamán megnehezítette a projekt menetét, de összességében elmondhatom, hogy nagyon várom azt, hogy a megépített akkumulátormonitorozó rendszer egy új fejlesztés részeként a központi vezérlő elkészülésével együtt, előbb tesztkörülmények közt, később pedig éles körülmények között is üzemeljen.

11 Köszönetnyilvánítások

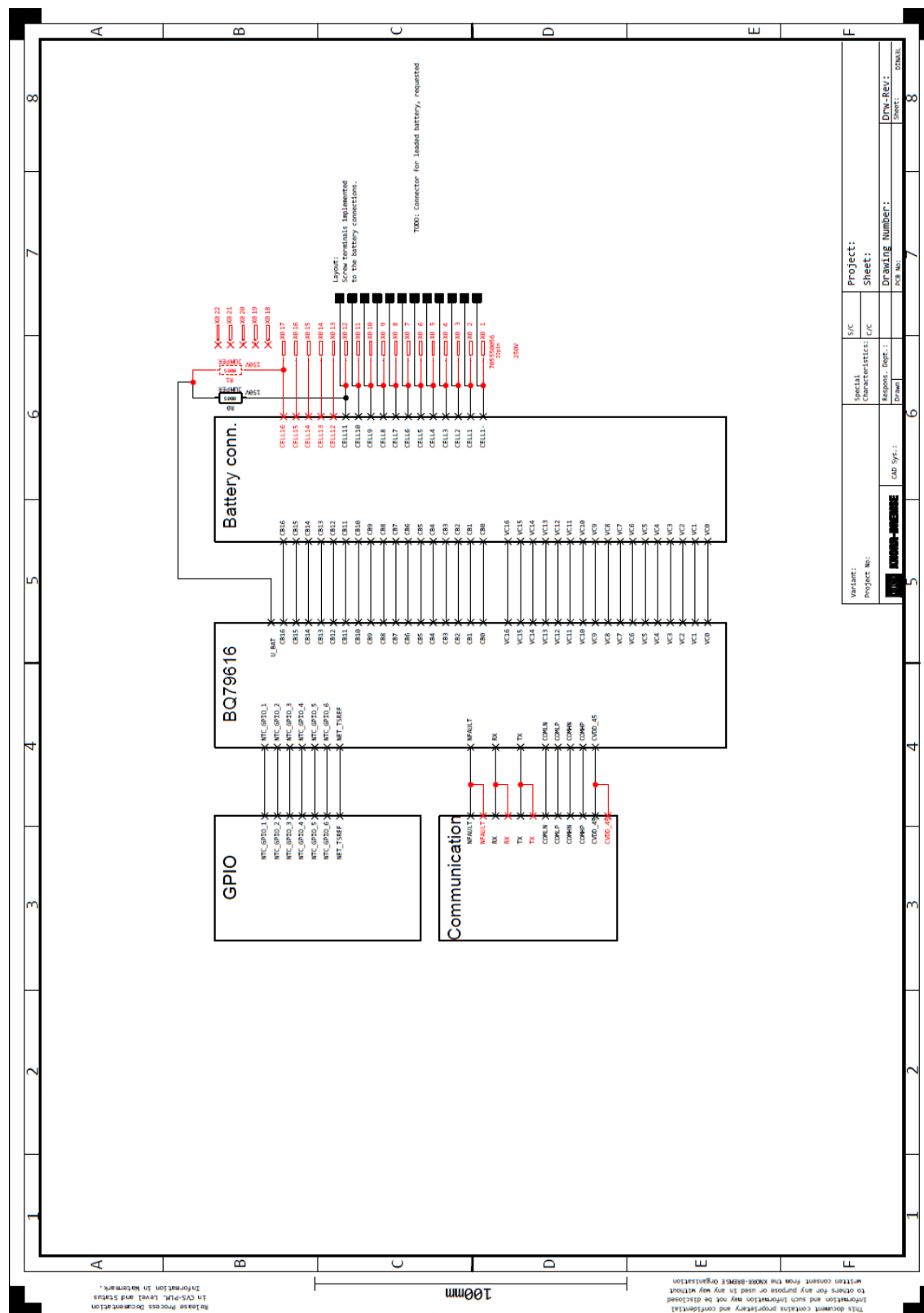
Ezúton szeretném megköszönni a Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.-nek, hogy diplomamunkámat a vállalat egyik projektjéből készíthettem. Szeretném megköszönni egyetemi konzulensemnek dr. Sujbert Lászlónak a félév alatt tanúsított segítségét és türelmét és Gyetván Péternek, a céges konzulensemnek a félév során nyújtott támogatását. Szintén jár a köszönet Tar Lajos és Szabó Bálint kollégáimnak, akik rengeteget segítettek a nyomtatott áramkör tervezés során, ha nehézségeim adódtak, vagy elakadtam, illetve az igényelt alkatrészeket is segítettek minél hamarabb létrehozni, és frissíteni az alkatrészkönyvtárat. Szeretném megköszönni az Knorr-Bremse Incubator csoport tagjainak a segítségét és azt, hogy részt vehetek ebben az új fejlesztési projektben.

12 Irodalomjegyzék

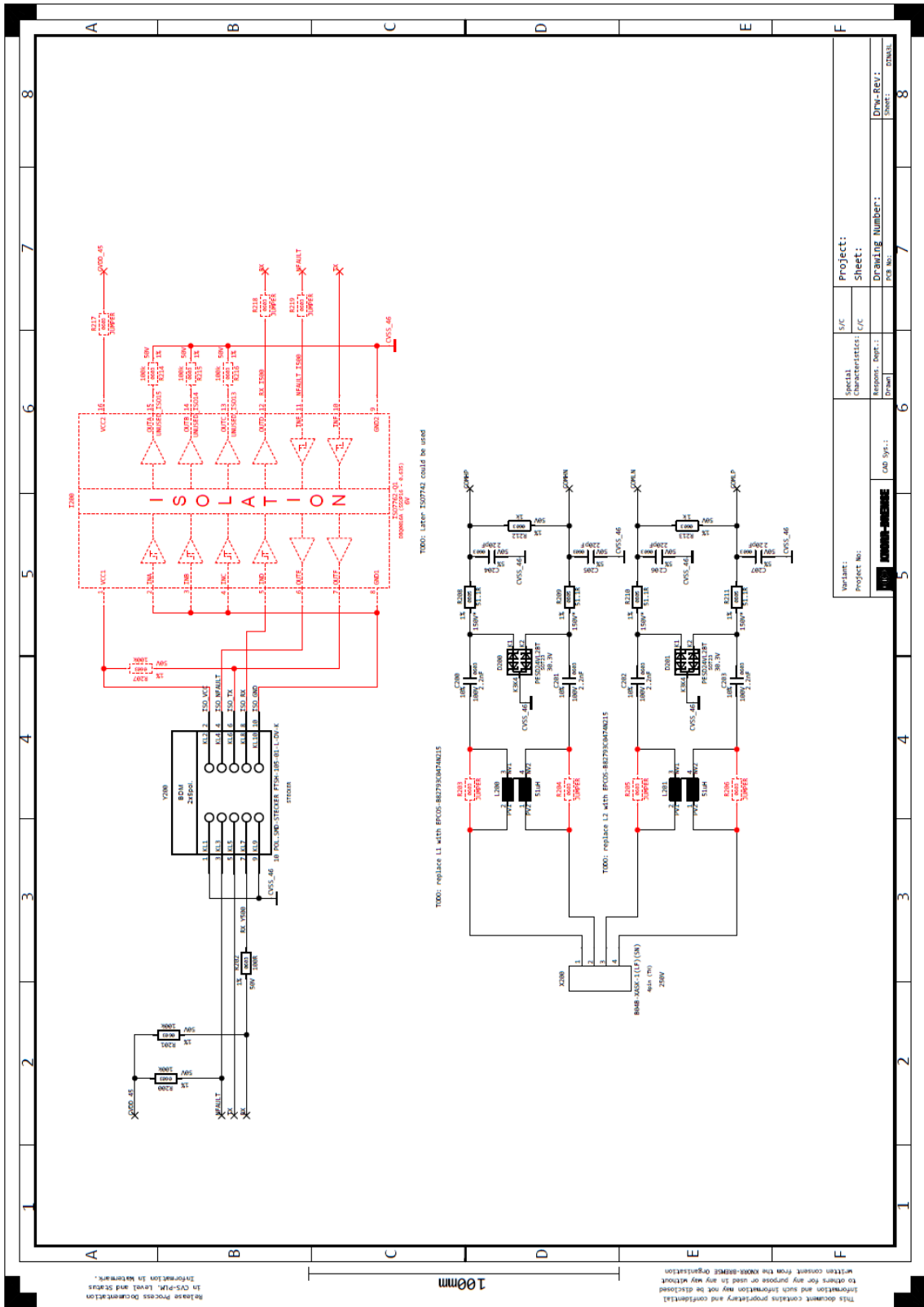
- [1] J. A. A. P. Talbot, „The history and development of batteries,” 30 April 2015. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>. [Hozzáférés dátuma: 29 03 2021].
- [2] U. Koehler, „General Overview of Non-Lithium Battery Systems and their Safety Issues in Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444637772000025>. [Hozzáférés dátuma: 20 március 2021].
- [3] Battery University, „Summary Table of Lithium-based Batteries,” 20 November 2020. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries. [Hozzáférés dátuma: 29 Március 2021].
- [4] B. University, „Battery Definitions and what they mean,” 11 2017. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions. [Hozzáférés dátuma: 27 március 2021].
- [5] Synopsys, „What is a Battery Management System?,” Synopsys, [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>. [Hozzáférés dátuma: 01 12 2021].
- [6] A. Beck, „Why proper cell balancing is necessary in battery packs,” november 2017. [Online]. Available: <https://blog.epectec.com/why-proper-cell-balancing-is-necessary-in-battery-packs>. [Hozzáférés dátuma: 23 március 2021].
- [7] S. Dharangaonkar, „Cell Balancing for Maximum Battery Pack Performance,” ionenergy, 2 September 2019. [Online]. Available: <https://www.ionenergy.co/resources/blogs/cell-balancing-better-performance/>. [Hozzáférés dátuma: 1 12 2021].

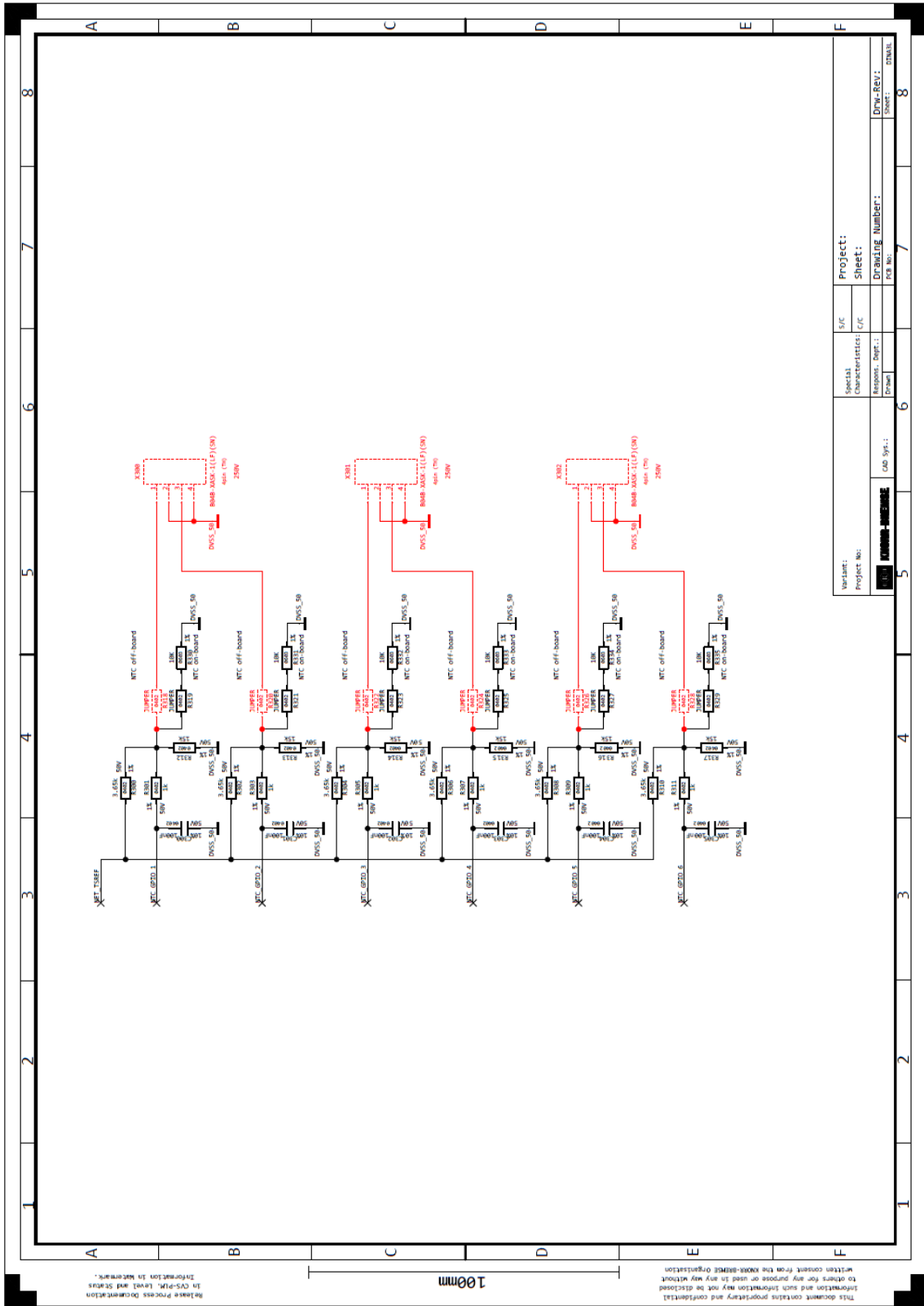
- [8] A. Raj, „Cell Balancing Techniques and How to Use Them,” 23 February 2019. [Online]. Available: <https://circuitdigest.com/article/cell-balancing-techniques-and-how-to-use-them>. [Hozzáférés dátuma: 1 12 2021].
- [9] A. Reindl, H. Meier és M. Niemetz, „Scalable, Decentralized Battery Management System Based on Self-organizing Nodes,” 9 July 2020. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-52794-5_13. [Hozzáférés dátuma: 5 12 2021].
- [10] M.-K. T. a. M. Fowler, „A Review of Lithium-Ion Battery Fault Diagnostic Algorithms: Current Progress and Future Challenges,” Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada;, 8 March 2020. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1999-4893/13/3/62?type=check_update&version=1. [Hozzáférés dátuma: 5 12 2021].
- [11] M. Uzair, G. Abbas és S. Hosain, „Characteristics of Battery Management Systems of Electric Vehicles with Consideration of the Active and Passive Cell Balancing Process,” 13 August 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/>. [Hozzáférés dátuma: 5 12 2021].
- [12] T. Instruments, BQ7961x-Q1 Family of 12S, 14S, 16S Precision Automotive Battery Monitor, Balancer and, 2021.

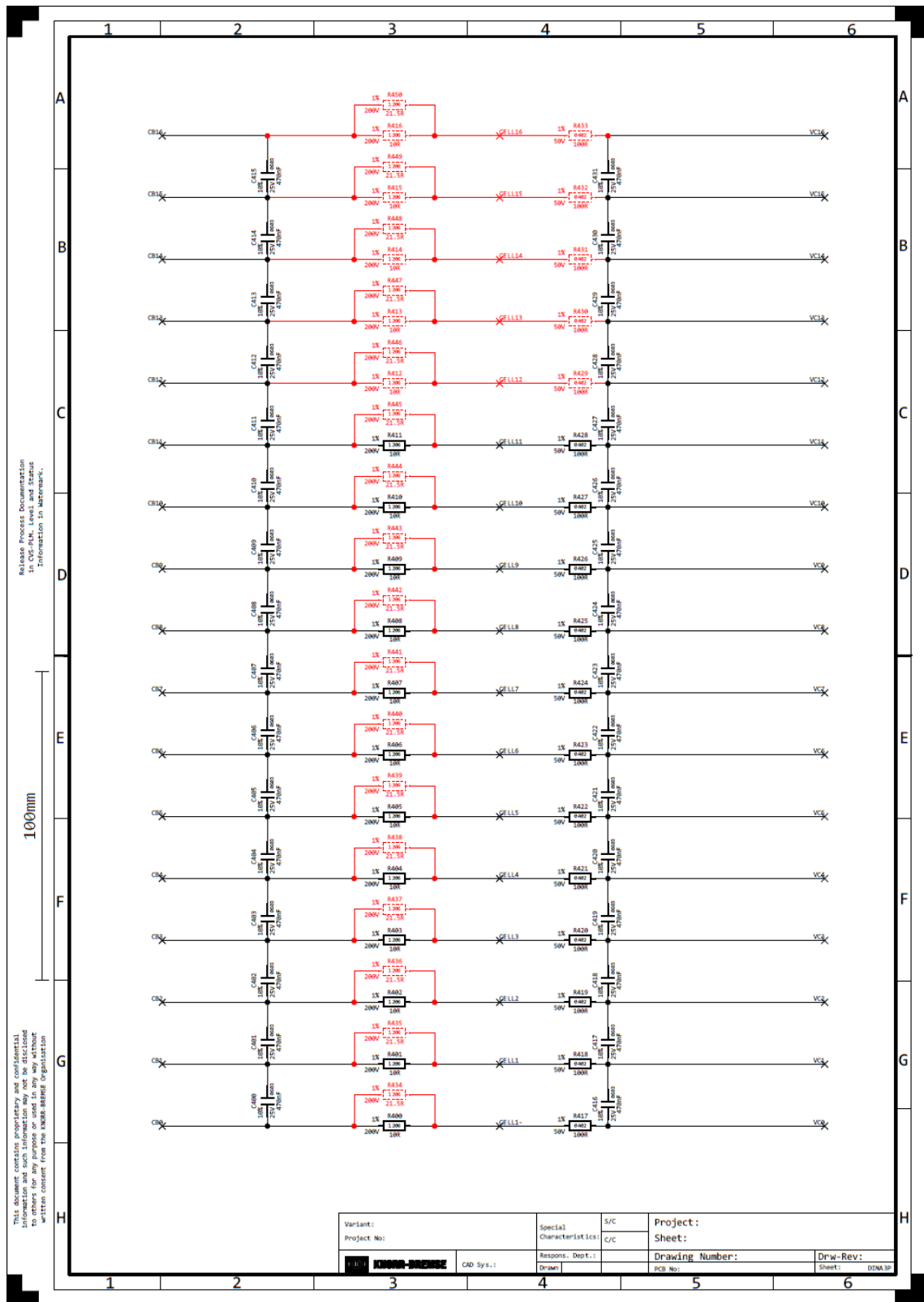
13.1 Az akkumulátor monitorozó egység kapcsolási rajza



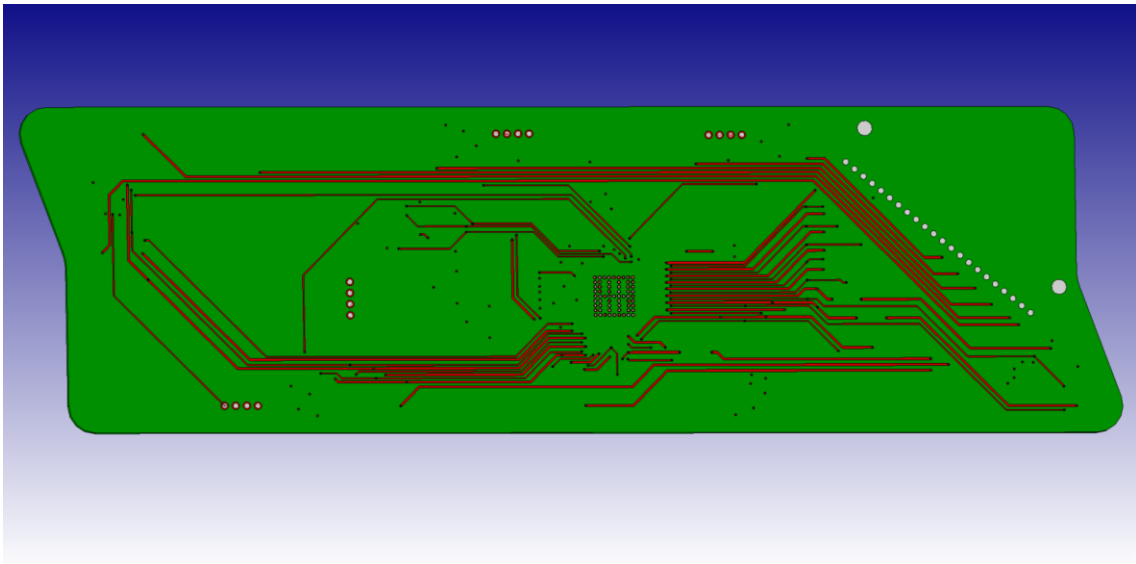
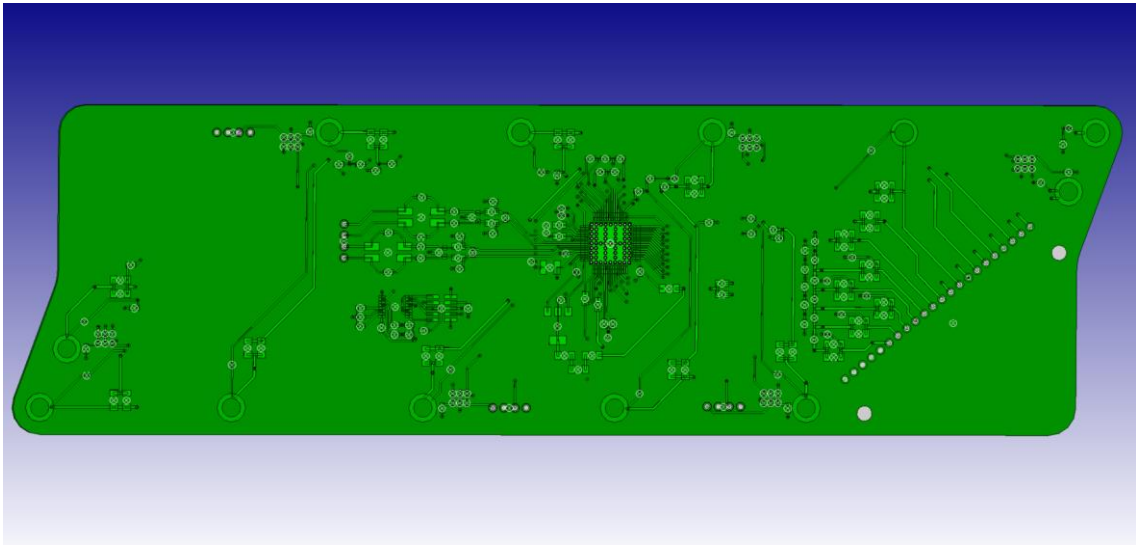








13.2 A megtervezett nyomtatott áramkör felső és alsó oldala



13.3 Az akkumulátor monitorozó egység 3D modellje

