



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Bódis Sándor Dániel

**AKKUMULÁTORCSOMAG FELÜGYELETI
RENDSZER FEJLESZTÉSE RAPID CONTROL
PROTOTYPING MÓDSZER
ALKALMAZÁSÁVAL**

KONZULENSEK:

Orosz György (BME-MIT)

Bérces Dániel (AVL AUTÓKUT Mérnöki Kft.)

BUDAPEST, 2016

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. Akkumulátorok	3
2.1. Alapfogalmak [1]	3
2.2. Gyakori akkumulátor típusok [5]	4
2.2.1. Nikkel-metál-hidrid (NiMH) akkumulátor	5
2.2.2. Lítium-ion (Li-ion) akkumulátor	6
2.2.3. Akkumulátortípusok összehasonlítása	7
2.3. Akkumulátorcellák kiválasztása	8
2.4. Li-ion akkumulátor töltése [1]	10
3. Akkumulátorfelügyeleti rendszer	12
3.1. Akkumulátorfelügyeleti rendszer fontosabb feladatai [1]	12
3.2. A rendszer felépítése	13
3.2.1. Akkumulátorfelügyeleti áramkör ki- és bemenetei	13
4. Rapid Control Prototyping	15
4.1. Rapid Control Prototypin ismertetése	15
4.2. Rendelkezésre álló Rapid Control Prototyping eszköz [13][14]	15
4.2.1. Motorvezérlő egység	16
5. Hardveres megvalósítás	17
5.1. A megvalósított akkumulátorfelügyeleti rendszer funkciói	17
5.2. Töltőáramkör [16]	17
5.3. Töltés kiegyenlítő áramkör	21
5.3.1. Passzív töltés kiegyenlítő áramkör [1]	21
5.3.2. Aktív töltés kiegyenlítő áramkör	22
5.3.3. Megvalósított töltés kiegyenlítő áramkör	26
5.4. Kisütőáramkör	28
5.5. Mérőáramkör	29
5.5.1. Feszültségmérés	29
5.5.2. Árammérés	30
5.5.3. Hőmérsékletmérés	31
5.6. Cellák védelme	32

5.7. Az elkészített áramkör	33
5.7.1. Az elkészített teljesítményáramkör megvalósítása	34
5.7.2. Az elkészített mérőáramkör megvalósítása	34
6. Szoftveres megvalósítás.....	36
6.1. Használt fejlesztői szoftverek	36
6.2. A szoftver felépítése	36
6.2.1. Inputs	38
6.2.2. Outputs.....	40
6.2.3. Logging [17]	40
6.2.4. BMS [17]	41
7. Tesztelés.....	45
7.1. MotoTron Developer ECU ki- és bemeneteinek megválasztása	45
7.2. Mérőáramkör tesztelése	47
7.3. Kisütőáramkör tesztelése	47
7.3.1. 5 perces kisütés teszt.....	47
7.3.2. Szoftveres védelem tesztelése.....	48
7.4. Töltéskiegyenlítő áramkör tesztelése.....	49
7.5. Töltőáramkör tesztelése	50
8. Összefoglalás és továbbfejlesztési lehetőségek	51
8.1. Összefoglalás	51
8.2. Továbbfejlesztési lehetőségek	51
Köszönetnyilvánítás.....	52
Irodalomjegyzék	53
Ábra- és táblázatjegyzék.....	55
Ábrák	55
Táblázatok.....	56

HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy 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, 2016. 12. 11.

.....
Bódis Sándor Dániel

Kivonat

Az elektromos autók mellett, hogy minimális (vagy nulla) károsanyag-kibocsátással rendelkeznek, a fenntartásuk is lényegesen olcsóbb, mint a tisztán belső égésű motoros társaiknak. Az elektromos autók hatalmas hátránya, hogy előállítási és tervezési költségeik felettébb magasak. A járművekben található elektromotor és akkumulátor jelentik a legnagyobb kiadásokat az elektromos autók gyártása során. Célunk, hogy az árért cserébe hosszú élettartamú és biztonságos járműveket biztosítsunk. Ezt elérhetjük az alkatrészek helyes megválasztásával és a rendszer megfelelő felügyeletével, szabályozásával. A biztonság és az élettartam meghosszabbításának egyik kulcskérdése, hogy az akkumulátorfelügyeleti rendszerek megfelelő töltési és kisütési profillal rendelkezzenek.

Szakedolgozatom témája az akkumulátorcsomag felügyeleti rendszerének fejlesztése, amely megoldást teremt a fent vázolt problémára. A kiválasztott akkumulátorpakk az elektromos autókban is használt megoldásnak a leegyszerűsített modellje. Ehhez készítettem egy áramkört, amely kisütni, tölteni és kiegyenlíteni tudja a cellákat, valamint mérni tudjuk a cellák feszültségét, hőmérsékletét és a felvett/leadott áramukat. Az áramkört egy motorvezérlő egységgel (ECU) tudjuk vezérelni, amelyet számítógépen keresztül irányíthatunk a mért értékek függvényében. A számítógép és az ECU közötti kapcsolattartásra egy MATLAB/Simulink modell alapú keretrendszert hoztam létre.

Az elkészült rendszert különböző teszteknek vetettük alá. Az tesztesetek döntő többségében az akkumulátorfelügyeleti-rendszer az elvárt működést hozta.

A szakdolgozatomban a valóságos rendszernek egy idealizált, egyszerűsített modelljével élve megvalósítottam egy az autóiiparban is használt felügyeleti rendszert, melynek továbbfejlesztésével a későbbiekben korszerű elektromos autókat tehetünk biztonságosabbá és költséghatékonyabbá.

Abstract

Besides the minimal (or zero) emission of the electric vehicles, their maintenance is much cheaper than the ones with internal combustion engine. The big disadvantage of the electric vehicles is the extremely high cost of producing and developing them. The electrical engine and the battery of the electric vehicles make their production that costly. Our goal is to provide long lifecycle and safe cars in compensation for the high prices. We can achieve this with the appropriate selection of the equipment and the correct monitoring and controlling of the system. One key element for the safety and long lifecycles is that the battery systems have to possess a correct charge and discharge profile.

The subject of my thesis is the development of the battery management system that can create a solution for the problem mentioned above. The chosen batterypack is the simplified model of the everyday ones used in electric cars. For the batterypack, I created an electrical circuit that can charge, discharge and balance the cells of the battery. In addition, the circuit can measure the voltage, current and temperature of the battery. The circuit can be controlled by an engine control unit (ECU) which we can control through a computer according to the measured values. For the communication between the ECU and the computer, I created a MATLAB/Simulink based framework.

The completed battery management system had been tested in various ways. By the end of the testing, most of the result turned out to be successful.

In my thesis work I created an idealized and simplified model of a real battery management system that can be used in modern electric vehicles with further developments.

1. Bevezetés

Elektromos járművekről abban az esetben beszélhetünk, ha meghajtásuk valamilyen elektromos motorral történik. Az elektromos járművek (Electrical Vehicle, EV) gyűjtőnév alá több különböző alkategóriájú járművet sorolhatunk. Ide tartoznak például hibrid elektromos járművek (HEV), a plug-in hibrid elektromos járművek (PHEV) és a tisztán akkumulátoros elektromos járművek (BEV). A hibrid járművek ötvözik az elektromos és a belső égésű motoros meghajtást. A plug-in hibrid járművek ezen felül újratölthető akkumulátorral, vagy valamilyen energiatároló egységgel rendelkeznek, melyet egy külső csatlakozón keresztül tudunk tölteni elektromos energiával. A tisztán akkumulátoros járművek pedig csak villamos meghajtással működnek.

1859-ben Gaston Planté találta fel az ólomsavas akkumulátort, amely az első újratölthető akkumulátor volt a világon. Találmánya egy olyan mérőföldkő volt, ami lehetővé tette az elektromos autók megjelenését az 1800-as évek végén. 1884-ben, Londonban Thomas Parker megépítette az első elektromos autót. A rákövetkező években hatalmas népszerűsége tett szert nagy teljesítménye, megbízhatósága és az általa megtehető relatív nagy távolságok miatt. Ezzel szemben a 19. század végén a belső égésű motorral rendelkező autók megbízhatatlanok, veszélyesek és zajosak voltak, valamint a teljesítményük is korlátozott volt. A századfordulóra felvirágzott a termelés, közel kétszer annyi villanymotoros autó volt forgalomban, mint belső égésű. Nagyvárosokban (New York, Párizs, London...) megjelentek az elektromos taxik és személyautók. Nagyjából 30000 elektromos autó volt az utcákon ekkortájt. Európában az elektromos járművek népszerűsége az első világháború kitöréséig töretlen maradt.

1918-ban, az első világháború után a benzines autók gyors fejlődésnek indultak. A belső égésű motorok megbízhatósága nagymértékben megnőtt, az üzemanyag olcsóvá és könnyedén elérhetővé vált, továbbá Henry Ford tömegtermelési technológiájának köszönhetően a benzines autókhoz sokkal olcsóbban lehetett hozzájutni, mint az elektromos meghajtásúakhoz. A villamos személyautók a következő évtizedekben szinte teljesen eltűntek a piacról, nem tudták felvenni a versenyt a társadalom igényeit hatékonyabban kielégítő belső égésű motoros társaikkal.

Az 1970-es évek olajválságai hatására az elektromos autó tervezésnek egy új korszaka kezdődött. A Ford, a General Motors és az AMC is belekezdett elektromos autó prototípusok fejlesztésébe. Kisebb gyártók, úgy mint a Sebring-Vanguard, az Elcar Corp

kis kétüléses városi autókat dobtak piacra, amelyek a mai napig használatban vannak. Az 1980-as években a Volkswagen és a Fiat is épített elektromos autókat. Ezeknek a járműveknek az ára azonban túl magas volt, így nem arattak osztatlan sikert.

Az 1990-es évek közepén, amikor a környezetvédelem és a klímaváltozás fontos tényezővé vált, ismét fellendült az érdeklődés az elektromos járművek iránt. 1990-ben Kaliforniában elfogadták az „Low Emission Vehicle Program”-ot, amely szerint törvényben előírták, hogy 1998-ra az eladott új járművek 2%-a károsanyagkibocsátás-mentes (zero emission) legyen és 2003-ra ezt az arányt 10%-ra növelnék. Az USA-ban a gyártók új elektromos autókat kezdtek fejleszteni, hogy betartsák a törvényt. Így piacra került például a General Motors EV1, Nissan Altra EV, Toyota RAV4 EV, Ford Ranger EV és S10 EV illetve ennek hatására a Ford felvásárolta a TH!NK-et, ami egy norvég villamos hajtású autókat fejlesztő cég. Sajnos a program teljes kudarcnak bizonyult. A járművek drágák voltak, így nem kelt el sok belőlük, az eladott példányok közül pedig sokat visszahívtak a gyártók, és megsemmisítették őket.

Európában a Peugeot, a Citroen és a Renault kezdett elektromos autókat fejleszteni. Közülük a Peugeot-nak és a Citroen-nek sikerült megvalósítaniuk városi autóikat. Az érdeklődés még mindig alacsony volt, habár az eladások felülmúlták a várakozásokat.

2003-ban megalapították a Tesla Motors autógyárat. 2008-ra sorozatgyártásba került a cég első autója, a Tesla Roadster. Ez volt az első elektromos gépkocsi, ami lítium-ion akkumulátort használt, és emellett egy töltéssel képes volt megtenni több, mint 320 km-t. 2012-ben piacra dobták az egyik legnagyobb példányszámban eladott elektromos autójukat, a Tesla Model S-et. [2]

Kritikus kérdés az elektromos autók esetében az akkumulátor megválasztása. Az elektromos autók akkumulátorai különböznek a fogyasztói elektronikai termékekétől (például a mobiltelefonokban vagy a laptopokban használt akkumulátortól). Sokkal szigorúbb követelményeknek kell megfelelniük. Nagy teljesítményeket kell kibírniuk (akár néhány száz kW-ot is) és képesnek kell lenniük nagy energiát tárolniuk (akár néhányszor tíz kWh-t) amellet, hogy a méretük és a tömegük felülről erősen korlátos.

Szakdolgozatomban az akkumulátor rendszerek működésével, felügyeletével foglalkozom, biztonságosabb és hatékonyabb működésre törekedve. A biztonság és az élettartam meghosszabbításának egyik kulcskérdése, hogy az akkumulátorfelügyeleti rendszer megfelelő töltési és kisütési profillal rendelkezzen. Feladatom, hogy létrehozzak egy áramkört, mely hatékonyan valósítja meg a rendszerrel szemben támasztott követelményeket.

2. Akkumulátorok

2.1. Alapfogalmak [1]

A fejezet és az egész szakdolgozat megértéséhez szükséges meghatározni az alábbi fogalmakat:

Cella, modul és pakk:

Cella: már egyetlen cella is egy teljes akkumulátor két áramvezetővel. Elkülönített részben vannak az elektródái, elválasztó sávja és az elektrolit.

Modul: több cellából áll, fizikai érintkezéssel az egyes cellák között.

Pakk: több modulból áll egyenként elszeparálva a jobb hőeloszlás miatt.

Amperóra-kapacitás:

Az Amperóra (Ah) kapacitás az a teljes töltés, amit a teljesen feltöltött akkumulátoron ki tudunk sütni meghatározott körülmények között.

C-arány:

Az akkumulátorok töltő és kisütő áramát C-aránnyal adják meg. Például egy 1.6 Ah-s akkumulátor, ha 1.6 A-rel töltünk, az 1 C-s töltőáramnak felel meg.

Fajlagos energia

Értéke meghatározza, hogy mennyi energiát képes tárolni az akkumulátor egységnyi tömegén (Wh/kg).

Fajlagos teljesítmény:

Egységnyi tömegre eső csúcsteljesítmény (W/kg).

Energiasűrűség:

Névleges energia értéke egységnyi térfogaton (Wh/l).

Teljesítménysűrűség:

Egységnyi térfogatra eső csúcsteljesítmény (W/l).

Belső ellenállás:

Teljes eredő ellenállás az akkumulátoron belül. Töltésnél és kisütésnél eltérő lehet az értéke.

Cutoff feszültég:

Gyártó által meghatározott legkisebb megengedhető feszültség szint. Úgy is értelmezhetjük, hogy ez az akkumulátor teljesen lemerül állapota.

Töltöttségi szint (State of Charge, SOC):

SOC az akkumulátor fennmaradt kapacitása, mely függ az üzemeltetési körülményektől úgy, mint a terhelő áramtól és a hőmérséklettől:

$$SOC = \frac{\text{Maradék kapacitás}}{\text{Névleges kapacitás}} \cdot \quad (2.1.)$$

Kisütési szint (Depth of Discharge, DOD)

DOD az akkumulátor kisütött kapacitás szintjét mutatja százalékban:

$$DOD = 1 - SOC \cdot \quad (2.2.)$$

Élettartam (ciklusok száma):

Az élettartam azt a kisütés-töltés ciklusszámot jelöli, amit még elbír viselni az akkumulátor, mielőtt meghibásodna, meghatározott DOD szint mellett (pl.: 80%).

State of Health (SOH)

Az SOH egy százalékos arány, ami megmutatja, hogy mekkora az akkumulátor aktuális energiakapacitása a gyárilag előírt kapacitásához képest.

$$SOH = \frac{\text{Aktuális kapacitás}}{\text{Névleges kapacitás}} \cdot \quad (2.3.)$$

2.2. Gyakori akkumulátor típusok [5]

Gyártó	Ország	Modell	Akkumulátor
GM	USA	Chevy-Volt	Li-ion
Ford	USA	Fusion Energy	Li-ion
Toyota	Japán	Prius, Lexus	NiMH
Honda	Japán	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	Dél-Korea	Sonata	Li-polymer
Crysler	USA	Chrysler 200C EV	Li-ion
BMW	Németország	X6	NiMH
		i3	Li-ion
BYD	Kína	E6	Li-ion
Daimler Benz	Németország	ML450, S400	NiMH
Mitsubits	Japán	iMiEV (2010)	Li-ion
Nissan	Japán	Leaf EV (2010)	Li-ion
		Altima	NiMH
Tesla	USA	Roadster (2009)	Li-ion
		Model S (2012)	Li-ion
Th!nk	Norvégia	Think EV	Li-ion

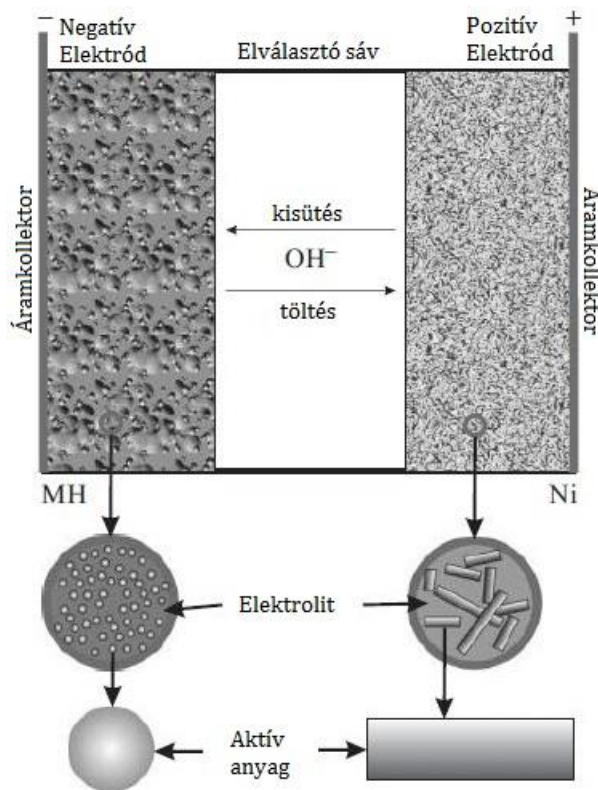
2-1. táblázat: Akkumulátor típusok néhány elektromos autónál [1]

Az elektromos autók körében jelenleg a leginkább elterjedt akkumulátortípusok (2-1. táblázat) a lítium-ion (Li-ion) és a nikkkel-metál-hidrid (NiMH). A NiMH-es technológiát főként a hibrid járműveknél, míg a Li-ion akkumulátorokat a plug-in hibrid és a tisztán villamos járműveknél alkalmazzák. A továbbiakban ezt 2 akkumulátortípust vizsgálom meg közelebbről.

2.2.1. Nikkel-metál-hidrid (NiMH) akkumulátor

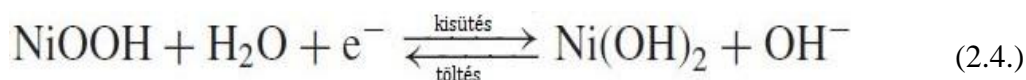
A NiMH akkumulátorok az ólomsavas akkumulátoroknál drágábbak és nagyobb teljesítményűek. Nagy hátránya, hogy érzékeny a túltöltöttségre, és relatív gyorsan képes lemeríteni önmagát, anélkül, hogy bármilyen terhelést kapcsolnánk rá. Az elméleti cella feszültség 1.35 V.

A NiMH akkumulátorcella (2-1. ábra) esetén a pozitív elektróda nikkkel-hidroxidot tartalmaz elsődleges aktív anyagként. A negatív elektróda főként hidrogénabszorbeáló nikkeltötvözetből áll. A cellában található egy elektromosan szigetelő elválasztósáv, alkáli elektrolit (pl: kálium-hidroxid oldat, KOH) és egy légtelenített fémház.

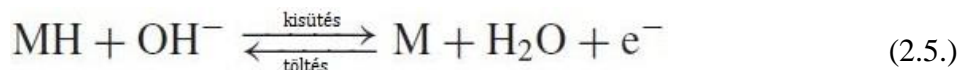


2-1. ábra: NiMH akkumulátor cella sematikus ábrája [5]

A kisütés során nikkkel-oxi-hidroxid (NiOOH) redukálódik nikkkel-hidroxiddá (Ni(OH)₂) a pozitív elektródán:



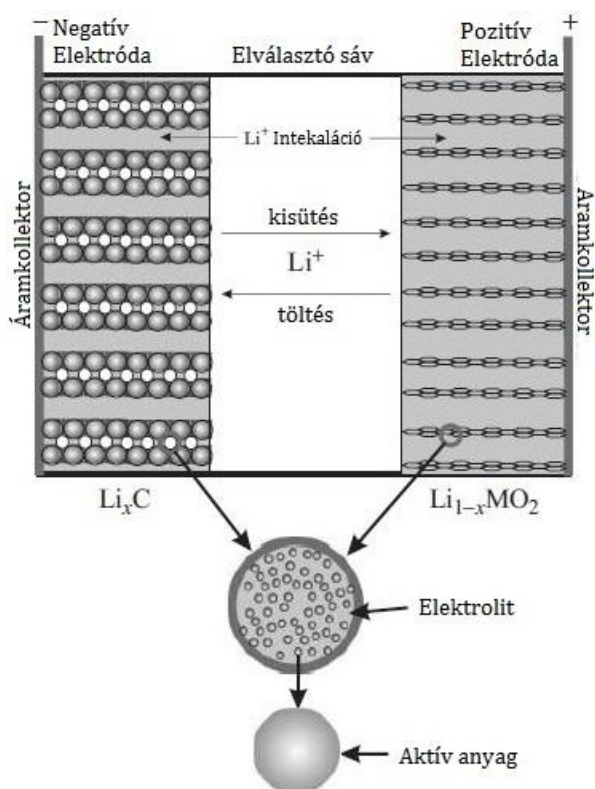
A hidroxid-ionok (OH^-) és elektronok áthaladnak az elválasztó sávon és a külső körön. A negatív elektródán, fém-hidrid (MH) oxidálódik fémötvezetté (M):



Több mellékreakció is káros lehet az akkumulátor cellára (pl.: túltöltés hatására), a cellában gáz képződhet, ami növeli a cella belső nyomását és csökkenti az élethosszát.

2.2.2. Lítium-ion (Li-ion) akkumulátor

A Li-ion akkumulátorok szélesebb körben alkalmazhatóak magas energiasűrűségük miatt. Főként olyan területeteken alkalmazzák, ahol a tömeg vagy a méret meghatározó fontosságú. Hosszú élettartamúak, átlagosan több mint 500 töltési ciklust bírnak el és alacsony az önmerítési rátájuk, ami körülbelül 5-10% évente. Magas gyártási költségei miatt érzékeny termékeknél csak elszórva alkalmazzák. A jövőben várhatóan csökkenni fog az ár a korszerűbb gyártás és technológiai fejlődés miatt.

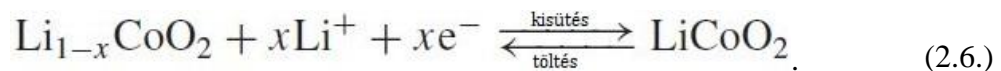


2-2. ábra: Li-ion akkumulátor sematikus ábrája [5]

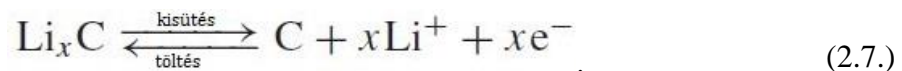
A Li-ion akkumulátorcella (2-2. ábra) esetén lítium fém-oxid (LiMO_2 , ahol az M egy fémet jelöl pl.: kobalt, Co) és lítiummal kezelt szén (Li_xC) alkotják az aktív anyagokat

a pozitív és negatív elektródán. A pozitív elektródán a fém valamilyen átmeneti fém, jellemzően kobalt. Az aktív anyagok kötődnek az áramkollektor fémfóliájához a cella mindkét oldalán és elektromosan el vannak szigetelve mikroporózus- vagy gél-polimerrel. A folyékony vagy gél-polimer elektrolitban a lítium ionok (Li^+) képesek diffundálni a pozitív és negatív elektróda között. A lítium ionok beépülnek a vagy kilépnek az aktív anyagból az interkalációs folyamat során.

Töltéskor a pozitív elektródán az aktív anyag oxidálódik és lítium ionok lépnek ki:



A negatív elektródán a töltés közben az aktív anyag redukálódik és lítium ionok vándorlásnak indulnak a pozitív elektródáról az elektroliton és az elválasztó sávon keresztül a negatív elektródához, ahol beépülnek.



A reakciók során 4,1-4,2 V-os cellafeszültség érhető el, ami sokkal magasabb, mint a Ni-MH akkumulátorcella feszültsége. A Li-ion akkumulátor teljesítménye és energiakapacitása az idő múlásával csökken. A teljesítménycsökkenés nagy probléma, melyet a belső ellenállás növekedése okoz. A belső ellenállás ohmikus veszteséget okoz, ami miatt hő termelődik, és sok energia vesz kárba, illetve gyorsítja az öregedést. Emellett a Li-ion akkumulátorcellák veszítenek kapacitásukból az idő múlásával, az elektródák és az elektrolit lebomlása (degeneráció) miatt. A degeneráció egy bonyolult folyamat, mely függ a cella típusától, kémiai összetételétől és fizikai kialakításától.

2.2.3. Akkumulátortípusok összehasonlítása

A 2-2. táblázat adatai alapján megállapítható, hogy a lítium-ion akkumulátorok magasabb árérték arányú cserébe sok tekintetben jobbak a Ni-MH-es társaikhoz képest. Nagyobb az élethosszuk és a teljesítményük. Mivel a lítium a legkönnyebb fém, így az ebből készült akkumulátorok sokkal könnyebbek a nikkell alapúaknál.

A számos előny mellett érdemes odafigyelni a hátrányokra is. Ha túltöltjük vagy a névlegesnél magasabb feszültséggel töltjük a lítium alapú akkumulátort, akkor hő fejlődik, és ez az akku felrobbanásához vezethet. Emiatt az akkumulátoroknak védőáramkörre van szüksége.

	Ni-MH	Li-ion
Névleges feszültség (V)	1.2	3.6
Üzemi feszültségtartomány (V)	1.0-1.4	2.7-4.2
Fajlagos energia (Wh/kg)	60-120	100-250
Élettartam (ciklusok száma) 80% DOD mellett	300-500	500-1000
Töltési idő (h)	2-4	1-4
Önmerítés/hónap (szobahő- mérsékleten)	30%	< 5%
Kisütés cutoff feszültség (V)	1	2.5-3
Töltési hőmérséklet (°C)	0-45	0-45
Kisütési hőmérséklet (°C)	-20-65	-20-60
Maximális kisütő áram	5 C	> 30 C
Ajánlott kisütő áram	0.5 C	< 10 C
Használatban (mióta)	1990	1991
Hatásfok	70-90%	> 98%
Ár	Közepes	Magas

2-2. táblázat: Ni-MH és Li-ion akkumulátorok összehasonlítása [6]

2.3. Akkumulátorcellák kiválasztása

A Li-ion akkumulátorcellák jobb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a Ni-MH típusúak, ezért a szakdolgozatom elkészítéséhez én is lítium-ion cellákat választottam. Továbbá fontos szempont, hogy a kiválasztott akkumulátorcellák az autógyártásban is előszeretettel alkalmazzák népszerű modellekben, valamint legyenek olcsók és könnyen beszerezhetőek.

Megvizsgálva a 2015-2016-ban legnagyobb példányszámban eladott autók listáját: Tesla Model S, Nissan LEAF, Chevrolet Volt, BMW i3, Ford Fusion Energi stb.. [7][4] megfigyelhetjük, hogy a lista elején szereplő modellek kivétel nélkül Li-ion akkumulátort használnak. Ezek után a végső szempont az ár volt.

Az elektromos autók akkumulátorai közül, a Tesla Model S-ben található Panasonic NCR18650B akkucellára esett a választás, mely cellánként nagyjából \$3-ba kerül. Ebből 7104 darab található az Tesla S Model-ben. Ezek a cellák 16 modulra vannak osztva, melyek egymással sorosan vannak kapcsolva. Minden modul 6 csoportra oszlik,

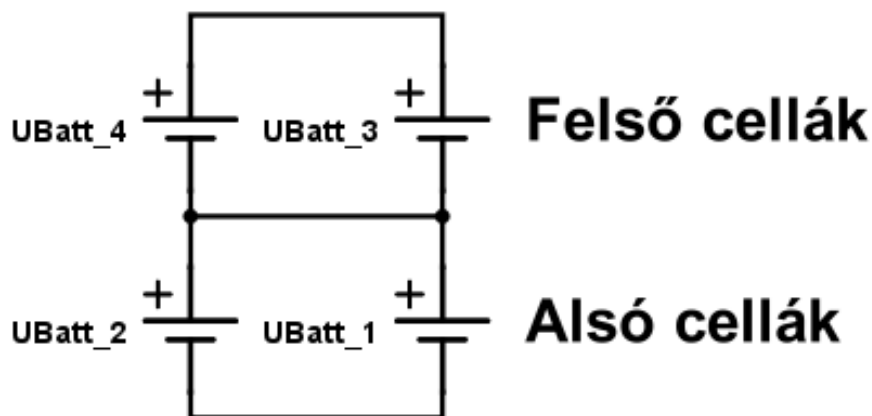
egymással sorosan kapcsolva és minden csoportban 74 cella található, amik párhuzamosan vannak kötve. [8]



2-3. ábra: Panasonic NCR18650B akkumulátorcella

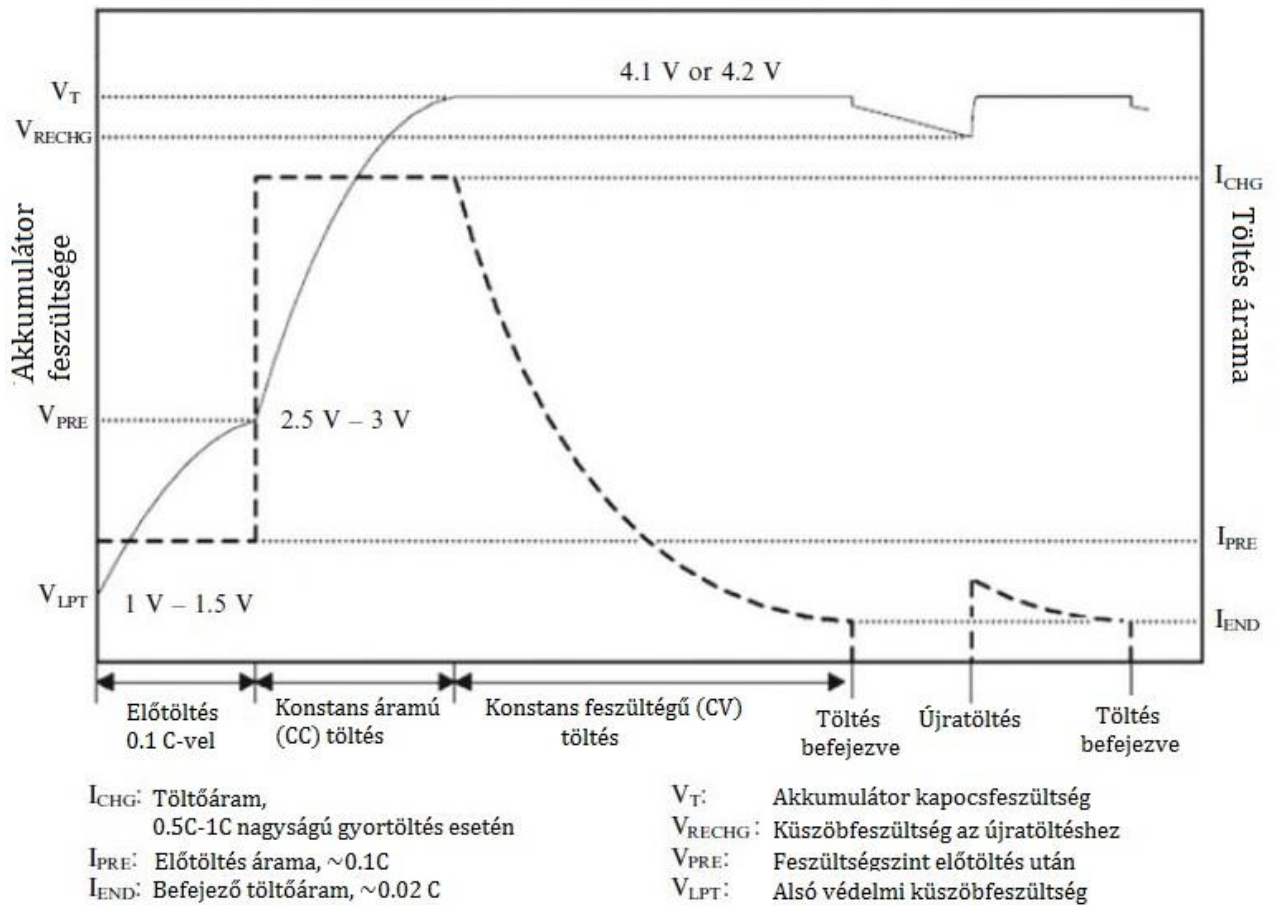
Az akkumulátorpakkomban 4 db Panasonic akkumulátor cellát fogok használni. 2-2-t párhuzamosan kapcsolva, melyeket sorosan kapcsolok egymással. A 2-2 párhuzamos cella a Teslában található akkumulátor csoportoknak a modellje, 74 cella helyett 2 cella lesz egymással párhuzamosan kötve. Ezeket sorba kötve a Tesla S Model egy akkumulátor moduljának egy egyszerűsített modelljét kapjuk. Ezen az leegyszerűsített modellen az összes szükséges funkciót le lehet modellezni, amit egy akkumulátorfelügyeleti rendszernek tudnia kell.

A könnyebb érthetőség miatt a továbbiakban a magasabb potenciálon lévő két cellát „felső cellák”-nak, az alacsonyabb potenciálon lévő két cellát pedig „alsó cellák”-nak fogom hívni.



2-4. ábra: Akkumulátorcellák elrendezése és elnevezésük

2.4. Li-ion akkumulátor töltése [1]



2-5. ábra: Li-ion akkumulátor tipikus töltési karakterisztikája [1]

A lítium-ion akkumulátorok érzékenyek a túltöltöttségre és a mélykisülésre, így fontos, hogy pontosan meg tudjuk valósítani a szükséges töltési karakterisztikát (**2-5. ábra**). A töltés az alábbi részfolyamatokból épül fel:

Előtöltés:

A kondicionáló előtöltéskor kis árammal ($\sim 0.1C$) biztonságos feszültség szintre töltjük az akkumulátort, ahonnan el tudjuk kezdeni a konstans árammal való töltést. Akkor lehet fontos, ha hosszabb ideig használaton kívül van az akku, és ez alatt könnyedén mélykisüléssel állapotba kerülhetett.

Konstans áramú töltés:

Konstans árammal töltjük az akkumulátort $0.5C - 1C$ -vel, amíg el nem éri a maximális cellafeszültségét.

Konstans feszültségű töltés:

Ha a cella feszültsége elérte a gyártó által meghatározott maximális értéket, akkor a cella maximális konstans feszültségével töltjük tovább a cellát, amíg a töltő áram le nem csökken az az előre meghatározott minimális értékre (pl.: 0.02 C).

Újratöltés:

Ha a cella feszültsége töltés után lecsökkent a maximális értékről egy előre meghatározott küszöbértékre, akkor konstans feszültséggel ismét feltöltjük a fent leírt módon.

3. Akkumulátorfelügyeleti rendszer

Az akkumulátorfelügyeleti rendszer (Battery Management System, BMS) felelős a töltés és a kisütés felügyeletéért. Kontrollálja az akkumulátorba be- és kifolyó áramkat. Megakadályozza a cellák túltöltését vagy mélykisülését, és ha az akkumulátorcellák eltérő töltöttségi szinten vannak, akkor azokat azonos szintre tudja hozni. Ezen felül figyeli a rendszer, hogy az akkumulátor megfelelő hőmérsékleti tartományban működjön (ha nem akkor lekapcsol). [5]

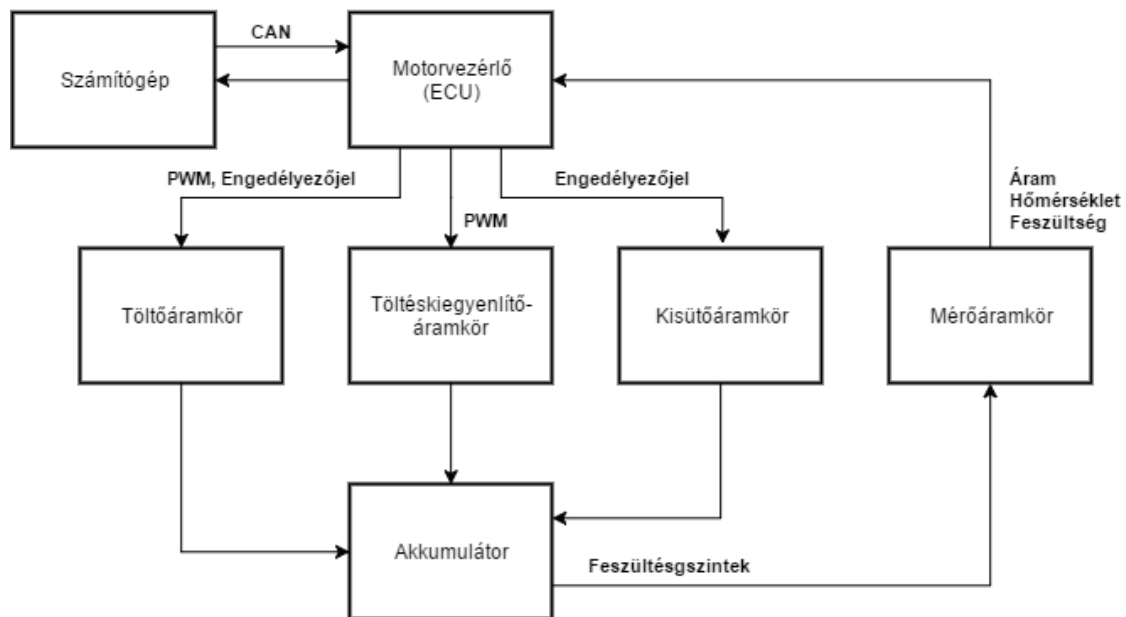
3.1. Akkumulátorfelügyeleti rendszer fontosabb feladatai [1]

Az akkumulátorfelügyeleti rendszer autóiipari alkalmazása esetén fontos, hogy minden körülmény között megbízhatóan működjön. A lényeges paraméterértékeket a legszélsőségesebb esetben is lehessen mérni, és a mért értékek alapján a rendszer meg tudja hozni a szükséges lépéseket (például a rendszer teljes leállítását). A felügyeleti rendszer képes legyen kommunikálni a jármű más vezérlő egységeivel és az akkumulátorral.

A BMS legfontosabb feladatai:

- Az akkumulátorcellák állapotának monitorozása:
 - Feszültség: képes mérni az akkumulátor teljes feszültségét, a cellák egyenkénti valamint minimális/maximális feszültségét.
 - Hőmérséklet: monitorozni tudja az egyes cellák hőmérsékletét, átlag hőmérsékletet vagy a hűtőközeg hőmérsékletét.
 - Töltöttségi szint (SOC) vagy kisütési szint (DOD) számítása: áram vagy feszültségmérés alapján.
 - State of Health (SOH) számítása.
 - Áram: az akkumulátorba be- és kifolyó áramok mérése.
- Akkumulátor töltésének vezérlése.
- Cellák védelme:
 - Túláramvédelem (töltésnél és kisütésnél eltérő lehet).
 - Túlfeszültségvédelem (töltésnél).
 - Küszöb alatti feszültség elleni védelem (kisütésnél).
 - Túl nagy és túl kis hőmérséklet elleni védelem (töltésnél és kisütésnél egyaránt).
- Cellák töltöttségszint-különbségének kiegyenlítése.
- Kommunikáció más vezérlő egységekkel.

3.2. A rendszer felépítése



3-1. ábra: Akkumulátorfelügyeleti rendszer felépítése

Az áramkör magját MotoTron Control Solution (**4.2. fejezet**) egység adja, melyet számítógéppel tudunk vezérelni MATLAB/Simulink Motohawk keretrendszeren keresztül. Az áramkört 4 fő részre lehet osztani, melyek rendre:

- a töltőáramkör,
- a töltéskiegyenlítő áramkör,
- a kisütőáramkör,
- és a mérőáramkör.

Az egyes részek el vannak különítve egymástól az áramkörben. A motorvezérlő egység kimenetivel irányítjuk a rendszert az analóg-digitális átalakító (ADC) bemeneteken érkező jelszintek függvényében.

3.2.1. Akkumulátorfelügyeleti áramkör ki- és bemenetei

Bemeneti jelek:

- Impulzusszélesség-modulált (PWM) bemenetek:
 - A töltőáramkör DC/DC buck konverter MOSFET-jének vezérléséhez.
 - Töltéskiegyenlítő áramkörben az alacsony és a magas potenciálon lévő MOSFET-ek vezérléséhez (2 db.).

- Relé vezérlő jelek:
 - A teljes áramkör bekapcsolásához.
 - A töltőáramkör bekapcsolásához.
 - A kisütőáramkör bekapcsolásához.

Az ECU bemeneti jelei:

- Alsó cellák feszültsége.
- Teljes akkumulátorpakk feszültsége (feszültségosztóval elharmadolva).
- Söntellenálláson eső feszültség szint töltés és kisütés áramához (2 db.).
- Cella hőmérsékletének méréséhez az NTC termisztoron eső feszültség feszültségosztás után (2 db.).

Tehát az ECU-ból hat kimeneti és hat bemeneti jel csatlakozik az áramkörre. Továbbá fontos megemlíteni, hogy a rendszert 12 V-os tápfeszültségről üzemeltetjük. Ezt a feszültséget használják az IC-k, a relék, a hűtőventillátor és a termisztorok hőméréshez, valamint a töltőáramkör is a 12 V-os feszültséget alakítja át alacsonyabb értékre.

4. Rapid Control Prototyping

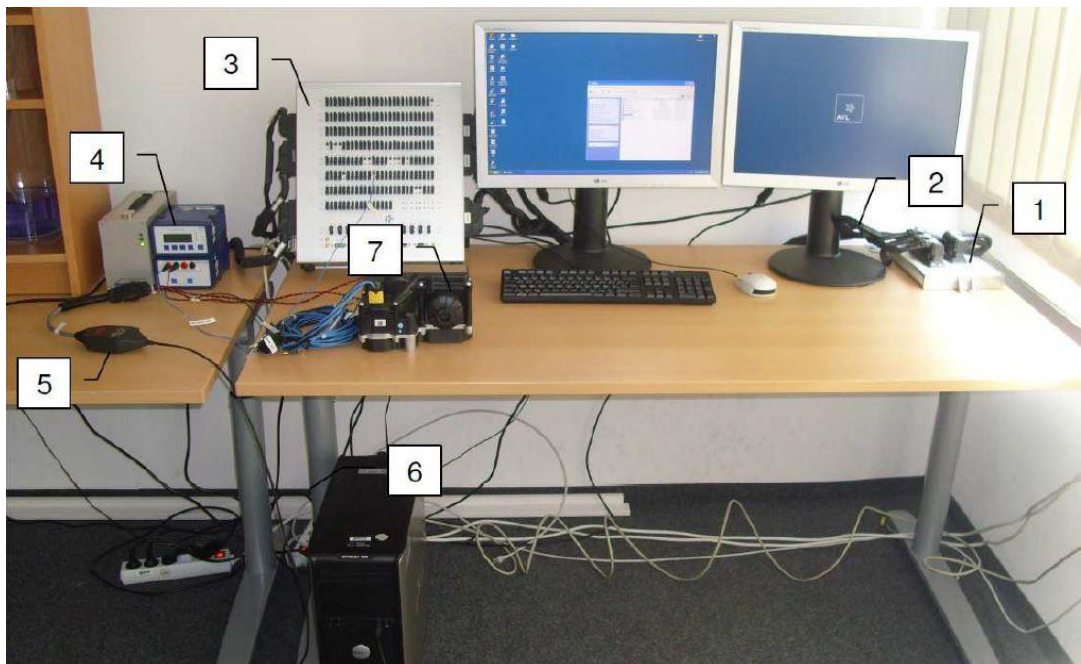
4.1. Rapid Control Prototypin ismertetése

A Rapid Control Prototypin (RCP) egy olyan tesztelési metódus, mely lehetővé teszi a mérnöki gyakorlatban a vezérlési stratégiák gyors tesztelését és ezek finomhangolását. A matematikai modellek MATLAB/Simulink segítségével automatikusan beimportálódnak egy valós idejű eszközbe, melynek ki- és bemeneti interfészei csatlakoznak a külvilághoz. Az RCP nagy előnye, hogy lerövidíti a fejlesztési időt azáltal, hogy a szükséges javításokat, módosításokat már a fejlesztés e korai szakaszában végre tudjuk hajtani. Ebben a szakaszban a hibák kijavítása sokkal gyorsabban és olcsóbban megtörténhet. [12]

4.2. Rendelkezésre álló Rapid Control Prototyping eszköz [13][14]

A szakdolgozatom során MotoTron Control Solution egységeit használtam a vezérléshez. Ez a környezet szárazföldi, tengerészeti és légi járművekben használt elektronikus vezérlőegységek fejlesztésének egyszerűsítésére és a költségeinek csökkentésére lett létrehozva.

MotoTron állomás főbb részei:



4-1. ábra: MotoTron állomás főbb részei [13]

- 1) Motorvezérlő egység (ECU)
- 2) Csatlakozó kábel az ECU és a Break Out Box (BOB) között
- 3) BOB
- 4) Tápegység és jelgenerátor
- 5) A BOB-ot és a fejlesztő számítógépet összekötő CAN-Bus interface
- 6) Fejlesztő számítógép
- 7) Tesztelendő alkatrész

4.2.1. Motorvezérlő egység

Egy modern villamos meghajtású motort a lehető legjobb teljesítmény elérésében egy sor szenzor és aktuátor segíti. Ezeknek az összehangolt, megfelelő működéséről egy közös vezérlő egység, az ECU (Engine Control Unit) gondoskodik.



4-2. ábra: ECM-0565-128-0702-C motorvezérlő egység

A feladatom során egy ECM-0565-128-0702-C típusú motorvezérlő egységet (**4-2. ábra**) használtam. Ez egy Development ECU, amit személygépkocsikban, tengeri járművekben és munkagépekben található ECU-k fejlesztéséhez alkalmaznak. Az egység lelke a Freescale MPC565 típusú 56 MHz-es mikroprocesszor, amely magas órajelenek köszönhetően összetett vezérlő eljárások gyors lefutását is lehetővé teszi.

Több általános analóg és digitális bemenet mellett a járművekben található szenzorokra specializált bemenetekkel is rendelkezik, mint például a lambda szonda vagy a kopogásérzékelő szenzor. A kimenetek típusa szintén változatos, munkám során a PWM kimeneteit, valamint a TTL jelszinteket előállító csatlakozókat használtam. Benetként pedig az ECU 10 bites 0 V - 5 V-os feszültségtartományú ADC-eket használom.

A CAN (Controller Area Network) 2.0B csatlakozó biztosítja a kapcsolatot a motorvezérlő egység és a járműben található egyéb vezérelhető berendezés között. Esetünkben ez az összeköttetés az ECU és a számítógép között van.

5. Hardveres megvalósítás

5.1. A megvalósított akkumulátorfelügyeleti rendszer funkciói

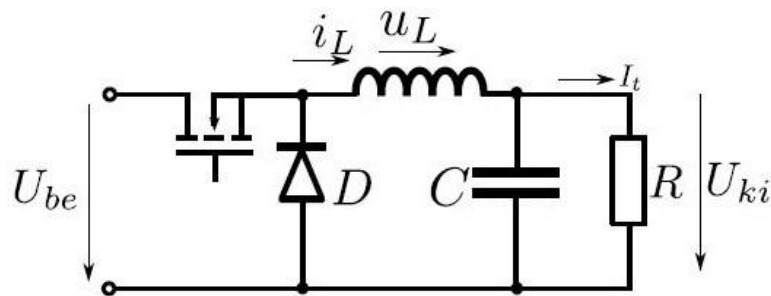
Az akkumulátorfelügyeleti rendszernek a **3.1. fejezetében** tárgyalt feladatai közül csak a lényegesebbeket emelném ki, melyekre nagy hangsúlyt fektettem az áramkör megtervezése során. Ezeket a funkciókat hardveresen is megvalósítottam:

- Töltőáramkör
- Kisütőáramkör
- Töltéskiegyenlítő áramkör
- Mérőáramkör:
 - Cellák feszültségének mérése
 - Akkumulátorba be- és kifolyó áramok mérése
 - Cellák hőmérsékletének mérése
- Túláramvédelem

A túlfeszültség, mélykisülés és a hőmérséklet elleni védekezés szoftveresen lett megoldva. Ha a megengedett tartományon kívüli értékeket mérünk, akkor egy relével le tudjuk lekapcsolni az akkumulátort a rendszerről. Továbbá a mért adatokat egy fájlban fel tudjuk jegyezni, és az akkumulátor töltöttségi szintjét ki tudjuk számolni a mért feszültségek függvényében.

5.2. Töltőáramkör [16]

A töltőáramkör a 12 V-os tápfeszültségről állítja elő a kimenetén a szükséges feszültség és áramértéket DC/DC kapcsolóüzemű step-down (vagy BUCK) feszültségátalakító segítségével (**5-1. ábra**). Az áramkör célja, hogy kimenetén biztosítani tudja a Li-ion akkumulátorra jellemző töltési karakterisztikát (**2-5. ábra**).



5-1. ábra: BUCK konverter [16]

Az áramkör kialakításához szükség volt egy tekercsre, egy nagy teljesítményű MOSFET-re, egy diódára és egy kondenzátorra. A MOSFET-et PWM-mel ki és bekapcsoljuk, melyhez egy meghajtó IC-re volt szükség, ami képes nagyobb feszültséget kiadni, mint a tápfeszültség és a FET nyitófeszültségének az összege. Az INFINEON IRS2117PBF modelljét választottam, mely képes végrehajtani ezt a feladatot.

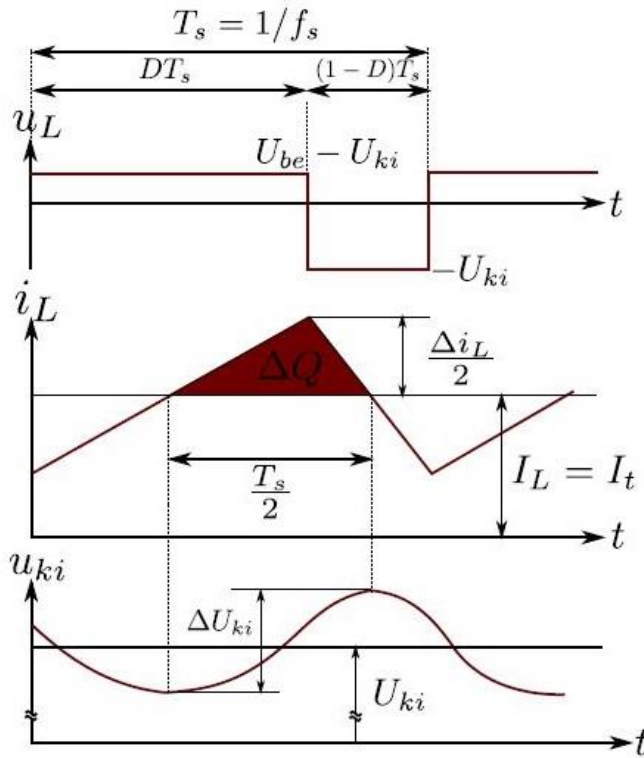
A névleges töltőáram legfeljebb 0.5 C - 1 C, ami a kiválasztott akkumulátorcellák esetében (két párhuzamosan kötött cella) 3.25 A - 6.5 A-t jelent. A biztonságosabb működés érdekében nem engedjük meg, hogy túl nagy áramok folyjanak töltés közben, ezért a rendszer a tartomány alsó áramszintjén üzemeltetjük, nagyjából 3 A-en.

Az akkumulátorcellák élethosszát csökkentheti a hosszú ideig tartó nagyobb áram- és feszültség hullámzás [5]. Ezért 5%-os maximális áramhullámzásra és 50 mV megengedett feszültség hullámzásra méretezem a töltőáramkört. A PWM kitöltési tényezője (D) határozza meg a BUCK konverter kimenetei feszültségének a nagyságát. 12 V-os tápfeszültségről állítjuk be a kimenet értékét legfeljebb 8.4 V-os feszültségre. Tehát a maximális kitöltési tényező:

$$D = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{8.4 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 0.7 = 70\%. \quad (5.1.)$$

A PWM kitöltési tényezőjét fogjuk a szabályozás során változtatni, hogy elérjük a kívánt karakterisztikát.

BUCK konverter használata esetén meghatározó fontosságú az induktivitás és a kapacitás helyes megválasztása. A tekercs induktivitásának nagyságától függ a kimeneti áramhullámzás (Δi_L). A kondenzátor kapacitásának nagyságától pedig a kimeneti feszültség hullámzás (ΔU_{ki}).



5-2. ábra: BUCK konverter feszültség és áram időfüggvényei [16]

Az induktivitás feszültsége, amikor a kapcsoló vezet (**5-2. ábra**)

$$u_L = U_{be} - U_{ki} = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta I_t}{\Delta T}, \quad (5.2.)$$

ha $\Delta I_{t,max} = 0.05I_t = 0.15 \text{ A}$ vagyis a maximálisan megengedhető áramhullámosság 5% és 200 kHz frekvenciájú PWM jelet használunk, hogy minél kisebb legyen a feszültség- és áramhullámzás mértéke. Továbbá $\Delta T = DT_s = \frac{D}{f_s} = 3.5 \mu\text{s}$. Ezek alapján az induktivitás minimális nagysága:

$$L = \frac{U_{be} - U_{ki}}{\frac{\Delta I_{t,max}}{\Delta T}} = 84 \mu\text{H}. \quad (5.3.)$$

Anyagi megfontolások miatt az Indel 220 μH -s 400 $\text{m}\Omega$ -os soros ellenállású 7.8 A megengedett áramú tekercsére esett a választásom. Az áramhullámzás értéke a tekercsen:

$$\Delta I_t = \frac{\Delta T}{L} (U_{be} - U_{ki}) = 57 \text{ mA}. \quad (5.4.)$$

A tekercs vesztesége sajnos elég nagy 3A esetén:

$$P_{ind} = I_t^2 R_L = 3.6 \text{ W}. \quad (5.5.)$$

A választott tekercs nagy disszipáció árán stabil áramkimenetet tud produkálni. Hasonló induktivitású és áramtűrésű tekercseknél ebben az árkategóriában nagy belsőellenállással

kell számolnunk (**5-1. táblázat**). A hűtés itt is elengedhetetlen, hűtőventillátor gondoskodik a tekercs megfelelő hőmérsékletéről.

Gyártó	Induktivitás	Áramtűrés	Soros ellenállás	Ár
Indel	220 μH	7.8 A	0.4 Ω	750 Ft
COILCRAFT	180 μH	14 A	0.052 Ω	5673 Ft
BOURNS JW MILLER	220 μH	2.8 A	0.15 Ω	2080 Ft
TALEMA	220 μH	3 A	0.3 Ω	950 Ft

5-1. táblázat: 200 μH körüli induktivitással rendelkező tekercsek

A kimeneti feszültség hullámzás oka a terhelő áram okozta feszültségesés, az ekvivalens soros ellenállása (ESR) és az ekvivalens soros induktivitása (ESL) a kapacitásnak (utóbbit elhanyagoljuk, de 1 MHz fölötti kapcsolási frekvenciákon érdemes figyelembe venni a hatását).

Ha feltételezzük, hogy az $ESR = 0$ és az induktivitás i_L árama nagyobb, mint az induktivitás I_t átlagárama, a többlet áram befolyva a kondenzátorba annak feszültségét és egyben u_{KI} kimenőfeszültségét is növeli. Ha az i_L kisebb, mint az I_t érték a hiányzó áramot a C kondenzátor biztosítja, így annak feszültsége és egyben az u_{ki} kimenőfeszültség is csökken. Felhasználva a kondenzátor töltése és feszültsége között ismert kapcsolatot ($\Delta Q = C\Delta U$) a feszültség hullámzás értéke **5-2. ábra** alapján: [16]

$$\Delta U_{ki} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_t}{2} \frac{1}{2f_s} = \frac{\Delta I_t}{8f_s C} \quad (5.6.)$$

Az ESR általában valamilyen kis érték ($\sim 0.1 \Omega$). Az ESR ellenállás okozta feszültség hullámzás $\Delta U_{ki} = \Delta I_t \cdot ESR$:

$$\Delta U_{ki} = \Delta I_t \left(ESR + \frac{1}{8f_s C} \right) \quad (5.7.)$$

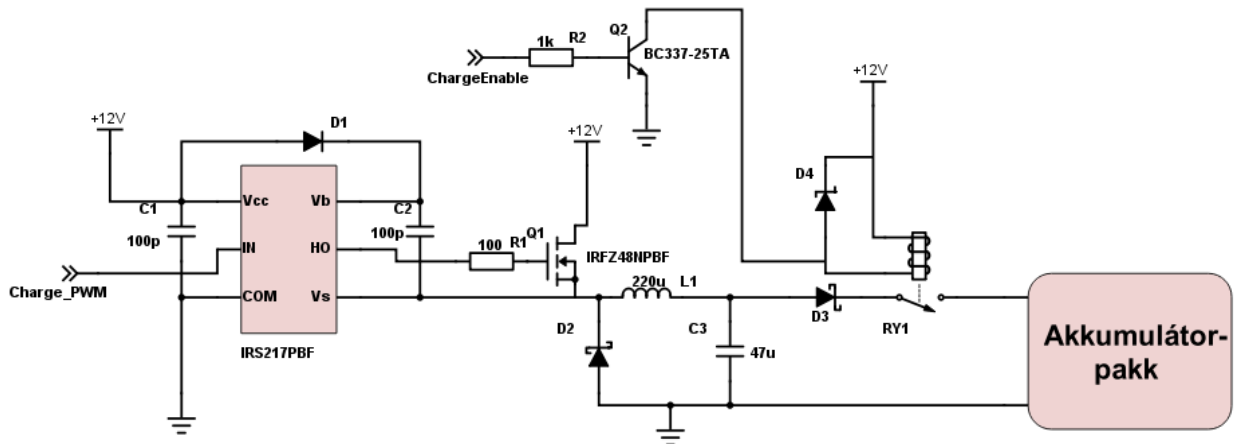
Ha feltesszük, hogy az $ESR = 0.15 \Omega$.

$$C = \frac{\Delta I_t}{8f_s (\Delta U_{ki} - \Delta I_t \cdot ESR)} = \frac{0.015}{8 \cdot 200000 (0.05 - 0.057 \cdot 0.15)} = 22.6 \mu F \quad (5.8.)$$

Kimeneti kondenzátornak egy 47 μF -os kapacitású elektrolit kondenzátort választottam. Ezzel a kapacitással a kimeneti feszültség hullámzás:

$$\Delta U_{ki} = 0.057 \left(0.15 + \frac{1}{8 \cdot 200000 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \right) = 9.3 \text{ mV} \quad (5.9.)$$

A töltőáramkörben International Rectifier IRFZ48NPBF teljesítmény MOSFET-et használok gyors be- és kikapcsolás ideje (12 ns és 34 ns), kis Drain-Source ellenállása ($R_{DS(on)} = 14 \text{ m}\Omega$) és nagy áramtűrése ($I_D = 64 \text{ A}$) miatt.



5-3. ábra: Töltőáramkör kapcsolási rajza

A töltőáramkört egy töltésengedélyező jellel tudjuk rákapcsolni az akkumulátorcellákra (**5-3. ábra**). Ha töltésengedélyező jel magas jelszintű, akkor a Q2-vel jelölt Fairchild Semiconductor gyártmányú BC337-25TA típusú tranzisztor vezetni kezd, aminek hatására a Rayex relé tekercsén áram kezd folyni, és átbillenti a kapcsolót zárt állásba. Az ellentétes irányú áramfolyástól a D3-mal jelölt nagyteljesítményű dióda védi meg a töltőelektronikát és a tápot.

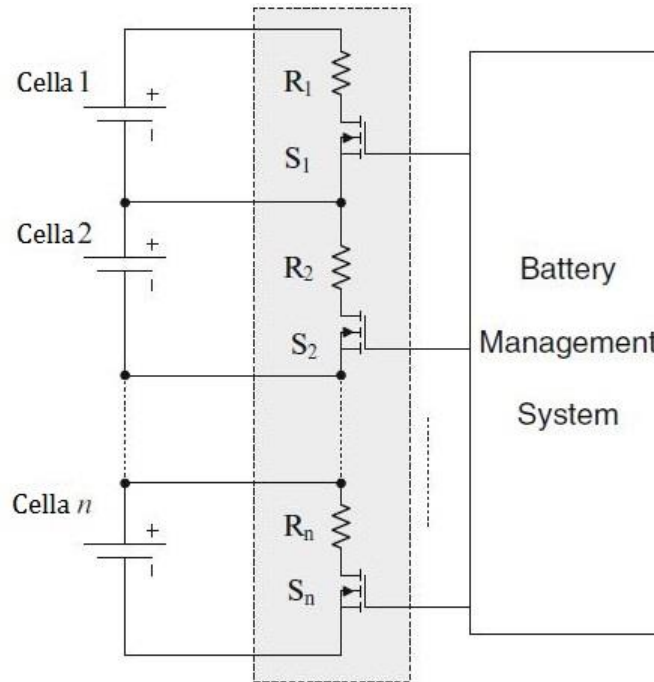
5.3. Töltés kiegyenlítő áramkör

A cellák balanszolása egy alapvető funkciója a BMS-nek, különösképp Li-ion akkumulátorok esetén. A töltés kiegyenlítésnek a célja, hogy a cellák azonos feszültség szinten (és azonos SOC-n) legyenek. Azért van rá szükség, mert az azonos típusú akkumulátorok kapacitása eltérő lehet. A gyártás során kis mértékben eltérhet a kémia összetétel az egyes cellák között vagy használat során öregedés miatt változhatnak az eszköz kémiai tulajdonságai. Emiatt egyes cellák töltéskor hamarabb töltődnek fel és túltöltést szenvedhetnek, vagy kisütéskor gyorsabban merülnek és mélykiülést szenvedhetnek. Alapvetően két típusa létezik a kiegyenlítő áramköröknek, az aktív és a passzív. [1]

5.3.1. Passzív töltés kiegyenlítő áramkör [1]

Egyszerűbb megoldás a balanszolásra a passzív kiegyenlítő áramkör (**5-4. ábra**). A küszöbszintnél magasabb töltöttségi szinten lévő cellákra rákapcsolunk terheléseket, amik kisülnek. Addig sűtjük ki a cellákat, míg mindegyik azonos töltöttségi szintre nem

kerül. A fizikai megvalósításban a felügyeleti rendszer a cellával sorosan kötött sönt ellenállást tudja rákapcsolni a cellára FET-ek segítségével. Töltés esetén az áramkör megvédi a cellákat a túltöltéstől. A megoldás az egyszerűségében hordozza nagy hátrányát is, nagyon energiapazarló, sok hő disszipálódik el az ellenállásokon. Hatásfoka ténylegesen 0%.



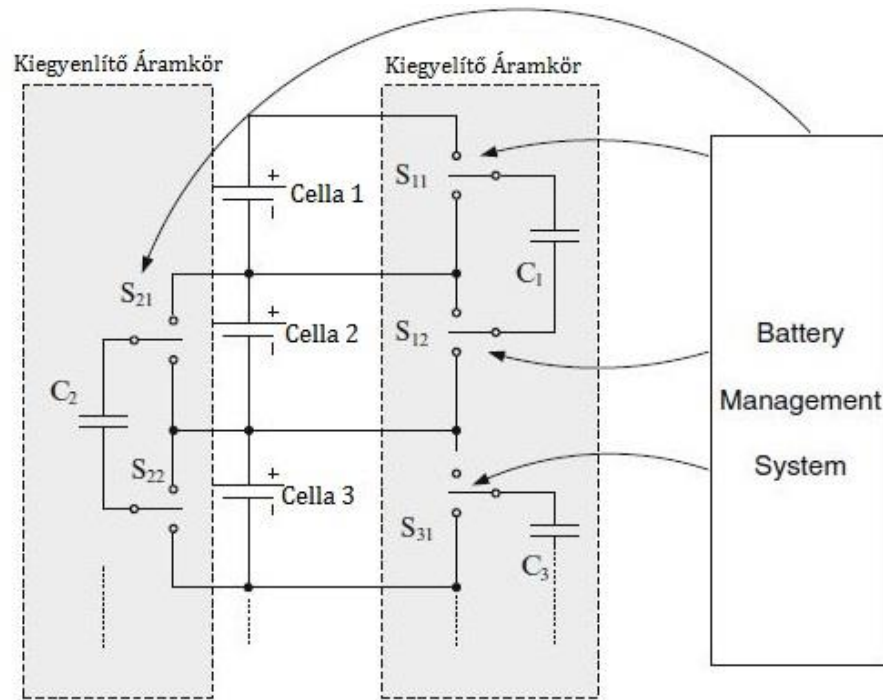
5-4. ábra: Passzív cella töltéskiegyenlítő áramkör [1]

5.3.2. Aktív töltéskiegyenlítő áramkör

Az aktív kiegyenlítőáramkör már hatékonyabb, de egyben bonyolultabb megoldás a problémára. A magasabb töltöttségi szintű akkumulátorcellákból az alacsonyabb töltöttségi szintűekbe mozgatják az energiát. A megvalósításra több különböző megoldás is van. Létezik kapacitív és induktív elven működő töltésátvivó kiegyenlítőáramkör.

5.3.2.1. Kapacitív elven működő kiegyenlítő áramkör [1]

Kapacitív elvű kiegyenlítő áramkör (5-5. ábra) úgy működik, hogy a kiegyenlítendő cellák közé kondenzátort kapcsolunk, és a kapcsolók ide-oda kapcsolgatásával töltést viszünk át a nagyobb feszültségű akkumulátorcellából a kisebbbe. Először rákapcsoljuk a kondenzátort a magasabb töltöttségű cellára, ami feltölti a saját feszültségszintjére, majd átkapcsoljuk a kondenzátort a kisebb töltöttségű akkumulátorra. Ekkor rövid időre áram indul a kondenzátorból cella felé, ami tölteni kezdi az akkumulátort. Ha már nem folyik áram visszkapcsoljuk a kapacitást az előző cellára. Ezt a folyamatot addig ismételjük, amíg a cellák töltöttsége azonos szinten nem lesz.



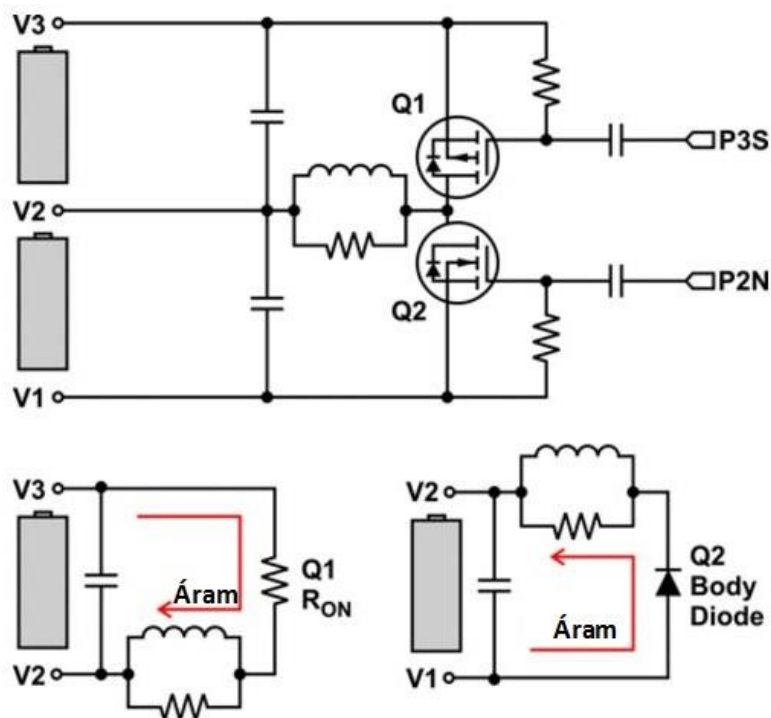
5-5. ábra: Kapacitív elven működő aktív kiegyenlítő áramkör [1]

Ha az összes sorba kapcsolt cella feszültségét szeretnénk kiegyenlíteni, akkor minden szomszédos cella közé egy kondenzátort kell kapcsolnunk. Így hatékonyabb algoritlussal kell vezérelnie a felügyeleti rendszernek a kapcsolókat a cellák sikeres kiegyenlítetttségéhez.

A kondenzátoron töltésekor nagy veszteségek keletkeznek, így hatásfoka körülbelül 50%-os, ami még messze nem ideális, de a passzív kiegyenlítésnél sokkal hatékonyabb. A kiegyenlítés sebessége függ a feszültségkülönbségtől, emiatt a kis feszültségkülönbségeken nem lesz hatékony ez az eljárás.

5.3.2.2. Induktív elven működő kiegyenlítő áramkör [10]

Induktív megoldás lehet az ún. PowerPump („teljesítmény pumpa”) kiegyenlítő áramkör. Egy MOSFET pár és egy nagy teljesítményű tekercs segítségével ki tudja egyenlíteni a kívánt cellákat. Két cella esetén viszonylag kevés alkatrészből megvalósítható az áramkör.



5-6. ábra: PowerPump aktív töltéskiegyenlítő áramkör [10]

A fenti áramkör (**5-6. ábra**) egy egyszerű buck-boost konverter elvén működő aktív töltéskiegyenlítő. Ha a felső cellából (V3) szeretnénk energiát szállítani az alsó cella (V2) számára, akkor a PS3 jellel vezérelni tudjuk a felső MOSFET-et. Egy impulzusszélesség-modulált jelet küldünk a FET Gate elektródájára, és ezzel megindul az energiaátvitel. Az áram folyni kezd a Q1 MOSFET-en keresztül a tekercsen. Amikor a PS3 jel lekapcsolja a Q1-et, akkor a tekercs árama a maximális szinten van (biztonságos tartományban). Mivel a tekercs áramfolyása nem szakadhat meg, a Q2 diódáján el tud folyni az áram az alsó cellán keresztül, és ezzel befejeződik az energiaátvitel. Az eljárás véges számú ismétléssel közel azonos szintre tudjuk hozni a cellák töltöttségi szintjét. A PowerPump töltéskiegyenlítés kimondottan hatékony eljárásnak számít, mivel a tekercs vesztesége viszonylag alacsony. Kis soros ellenállású tekercs esetén akár a 85%-os hatásfokot is elérhetünk.

Az áramkör működése szakaszokra osztható és ahhoz, hogy ezt fent tudjuk tartani, a PWM kitöltési tényezőjének 50% alatt kell maradnia. Minden egyes PWM periódus 3 elkülöníthető szakaszra osztható:

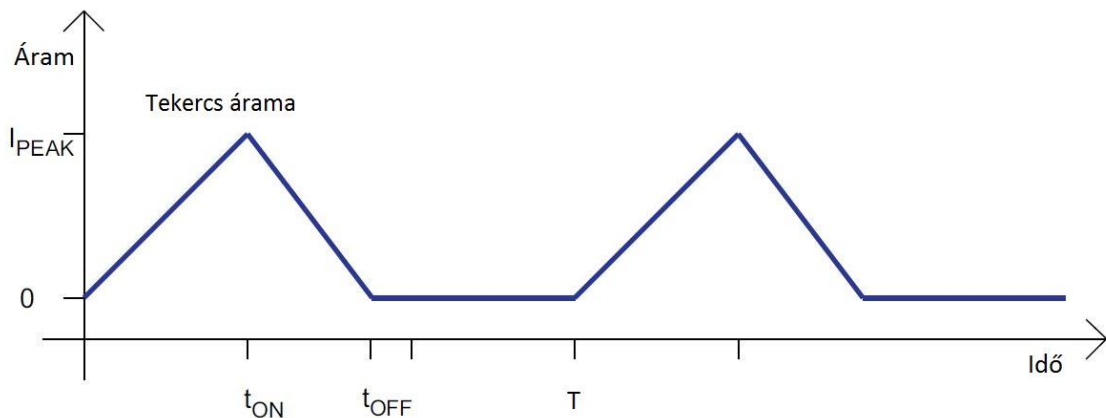
- A tekercs feltöltődik a magasabb töltöttségi szinten lévő cellákból.
- A tekercs kisül az alacsonyabb töltöttségi szinten lévő cellákba.
- A tekercs kikapcsol.

A tekercs árama bekapcsoláskor (**5-6. ábra**):

$$i_L(t = 0 \rightarrow t_{on}) = Ae^{-t \frac{r_{ds(on)}}{L}} + \frac{V_f}{r_{ds(on)}} = \frac{V_f}{r_{ds(on)}} \left(1 - e^{-t \frac{r_{ds(on)}}{L}}\right). \quad (5.10.)$$

Az $r_{ds(on)}$ magába foglalja az áramkör nem ideális paraméterei, mint például a tekercs ellenállását, és V_f a felső cella feszültsége V_a pedig az alsó cella feszültsége.

Fontos, hogy a tekercs ne kerüljön telítésbe és ne zárja rövidre az akkumulátor cellákat, ezért nélkülözhetetlen a tekercs helyes megválasztása. A választás során oda kell figyelni, a tekercs maximális áramtűrésére is. T a PWM periódus ideje, t_{on} bekapcsolástól számított, a tekercs maximális áramának eléréséig eltelt idő és t_{off} szintén bekapcsolástól számított idő, amely alatt a töltés után a tekercs árama újra eléri a nulla értéket.



5-7. ábra: PowerPump töltéskiegyenlítő áramkör tekercsének árama az idő függvényében

A tekercs a maximális áramát a töltési szakasz végén éri el, ekkor az értéke:

$$i_L(t = t_{on}) = \frac{V_f}{r_{ds(on)}} \left(1 - e^{-t \frac{r_{ds(on)}}{L}}\right) = I_{PEAK}. \quad (5.11.)$$

Az áram átlagértéke ebben a szakaszban:

$$I_{AVG} \cong \frac{1}{2} I_{PEAK} \cdot \frac{t_{on}}{T}. \quad (5.12.)$$

Az első szakaszban a V_f feszültséget ideális feszültségforrásnak tekintjük és nincs veszteség a tekercsen, ekkor a felső cellával sorba kapcsolt kondenzátor nagy frekvenciás áramforrásként viselkedik. A szükséges kondenzátor értékét az alábbi módon számíthatjuk:

$$C = I_{AVG} \frac{t_{ON}}{dV_C}. \quad (5.13.)$$

Ahol a dV_c a kondenzátoron megengedett feszültségváltozás. A második szakaszban a tekercs árama folyamatosan csökkenni kezd, amíg meg nem szűnik az áramfolyás (**5-7. ábra**):

$$i_L(t: t_{on} \rightarrow t_{off}) = \left(I_{PEAK} + \frac{V_a + V_D}{R_{PCB}} \right) \cdot \left(e^{-(t-t_{on})\frac{R_{PCB}}{L}} \right) - \left(\frac{V_a + V_D}{R_{PCB}} \right). \quad (5.14.)$$

Ahol R_{PCB} egy nagyon kis ellenállás az illesztéseknél, V_D pedig a MOSFET diódáján eső feszültség. A tekercs feszültsége:

$$V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = L \frac{\Delta I_L}{t_{OFF} - t_{ON}} = V_a + V_D. \quad (5.15.)$$

Átalakítva:

$$t_{OFF} - t_{ON} = L \frac{\Delta I_L}{V_a + V_D}. \quad (5.16.)$$

Ahol ΔI_L a tekercsen végbemenő áramerősség változás. Ekkor a tekercs átlagos kisütési árama:

$$I_{AVG} = \frac{\frac{1}{2} I_{PEAK} \cdot (t_{on} - t_{off})}{T}. \quad (5.17.)$$

A harmadik szakaszban a tekercsen nem folyik áram. Lényeges kérdés még a tekercsel párhuzamosan kapcsolt ellenállás értéke, mely csillapítja az áramkör lecsengéseit ebben a szakaszban. A csillapítás miatt az ellenállás értéke nem lehet túl nagy, azonban túl kicsi sem lehet, hogy az előző szakaszokban nagy áramok ne folyhassanak rajta keresztül. Jellemző értéke 2 k Ω . [10]

5.3.3. Megvalósított töltéskiegyenlítő áramkör

A magas hatásfoka miatt a PowerPump töltéskiegyenlítő eljárást valósítottam meg. A MOSFET-ek vezérléséhez szükségem volt egy high side/low side MOSFET Driver IC-re, ami a magasabb potenciálon lévő, felső két cellához tartozó FET-et is meg tudja hajtani. Ehhez az INFINEON IRS2011PBF eszközt választottam, ami megfelel a feladatnak.

A töltéskiegyenlítő áramkör MOSFET-jeinek, a töltőáramkörben is használt International Rectifier IRFZ48NPBF típusú eszközöket választottam. Szeretnék minél gyorsabban azonos feszültségszintre hozni az akkumulátorcellákat ezért a balansz áramkör FET-jeit vezérlő PWM frekvenciájának 200 kHz-et választottam. [10] Így a periódus ideje $T = 5 \mu s$. A kitöltési tényezőjét pedig 33%-nak választottam, hogy a lehető legjobb hatásfokot tudjam elérni. A bekapcsolási idő $t_{on} = 0.33 \cdot 5 \mu s = 1.65 \mu s$.

A tekercs maximális áramát 3 A-nek megválasztva az akkumulátorcellákon legfeljebb 1.5 A áram folyhat keresztül, így egy nagyjából 0.5 C-vel tudjuk tölteni az alacsonyabb töltöttségű cellákat. Az (5.12.) egyenlet szerint 3 A maximálisan megengedett tekercsáram és 0.1 V megengedett kondenzátor feszültségkülönbség esetén [10] az első szakaszban az átlagárama:

$$I_{AVG} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 3 \text{ A} \cdot 1.65 \mu\text{s}}{5 \mu\text{s}} = 0.495 \text{ A} . \quad (5.18.)$$

Amiből a kondenzátor értéke:

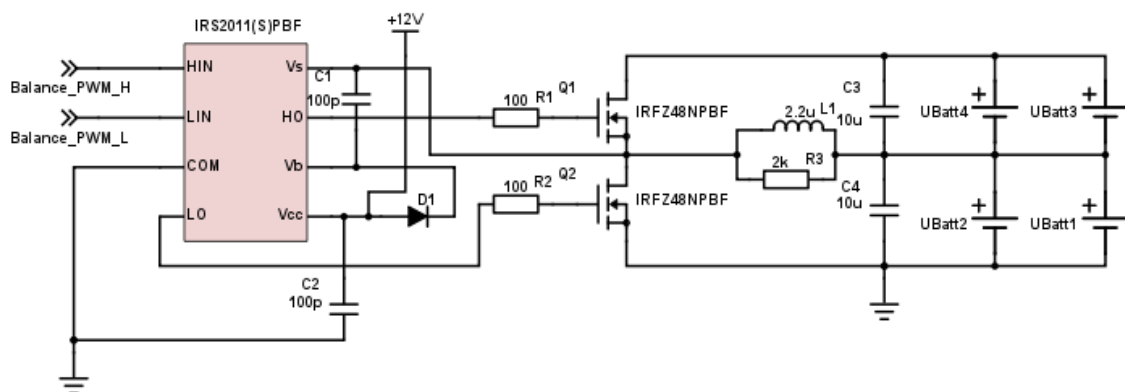
$$C = 0.495 \text{ A} \cdot \frac{1.65 \mu\text{s}}{0.1 \text{ V}} = 8.17 \mu\text{F} . \quad (5.19.)$$

A balanszáramkörbe két 10 μF -os elektrolit kondenzátor kapott helyet. Ha feltesszük, hogy a második szakasz ideje nagyjából megegyezik az első szakasz idejével, a cella töltöttsége 4.1 V és hogy a diódán eső feszültség elhanyagolható. [10] A tekercs megválasztása az (5.16.) egyenlet alapján:

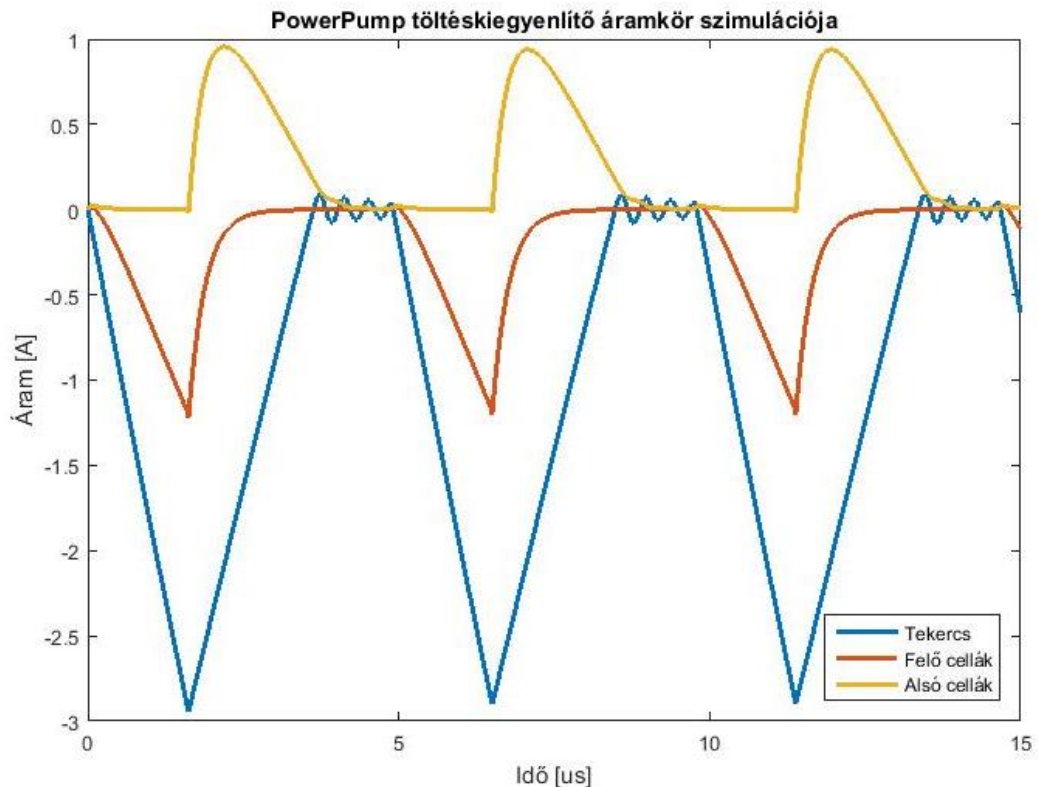
$$L = \frac{(t_{OFF} - t_{ON}) \cdot (V_a + V_D)}{\Delta I_L} = 2.2 \mu\text{H} . \quad (5.20.)$$

A töltéskiegyenlítő áramkör energiaátvitelének megvalósítására egy 2.2 μH induktivitású 8 A maximális áramú tekercs (WURTH ELEKTRONIK 744772022) mellett döntöttem. Az induktivitással párhuzamosan kötött ellenállás értékének az Texas Instruments által ajánlottat 2 k Ω -ot választottam [10].

Az áramkör megépítése előtt LTSpice XVII program segítségével leszimuláltam a töltéskiegyenlítő működését a fent ismertetett paraméterekkel (5-9. ábra). A szimuláció során a felső cellákkal töltöttem az alsó cellákat.



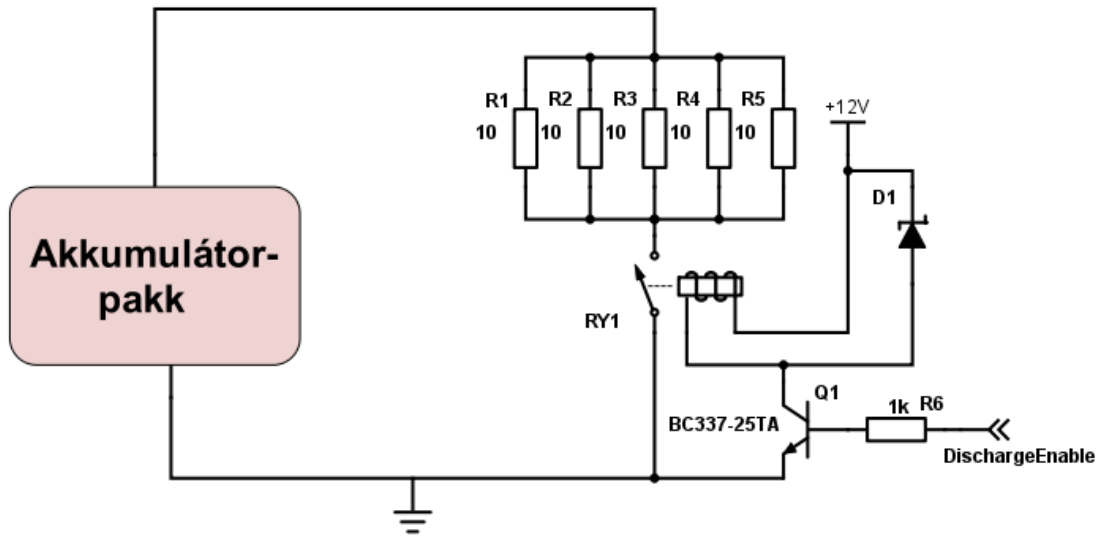
5-8. ábra: Töltéskiegyenlítő áramkör kapcsolási rajza



5-9. ábra: PowerPump töltés kiegyenlítés szimulációja

5.4. Kisütőáramkör

A cellák kisütését az akkumulátorral sorosan kapcsolt terheléssel oldottam meg (5-10. ábra). A cellákra tudunk kapcsolni egy relé segítségével 5 db. párhuzamosan kötött 10 Ω -os, 10 W-os teljesítményellenállást, így az eredő ellenállásuk 2 Ω lesz. Ez az ellenállás maximálisan, 4.1 V-ra töltött cellák esetén (8.2 V akkumulátor feszültség) 4.1 A áramerősséget fog eredményezni, ha elhanyagoljuk az árammérő söntellenállás és a olvadóbiztosíték ellenállását. Teljesítményellenállásokra pedig azért van szükség, mert ekkora áram mellett 33.62 W fog eldisszipálni, ami cellánként 6.724 W. Ekkora teljesítményen az ellenállások rengeteg hőt bocsátanak ki, emiatt gondoskodnunk kell hűtésről. Erre a célra egy szintén 12 V-ról üzemeltethető hűtőventilátorral (Titan TFD-6020M12B) szereltem fel az áramkört.



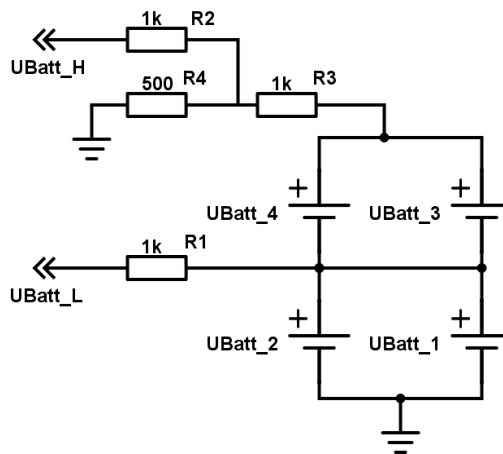
5-10. ábra: Kisütőáramkör kapcsolási rajza

5.5. Mérőáramkör

A mérőáramkör három funkciót lát el: feszültség-, áram- és hőmérsékletmérést. Fontos az elején megemlíteni, hogy az ECU 10 bites 0 V - 5 V-os feszültségtartományú ADC bemenetekkel rendelkezik, ezért a beérkező feszültségszinteket mindképp ebben a tartományban kell tartani. Ezen felül az ADC bemeneteket 1 k Ω -os áramkorlátozó ellenállásokkal láttam el.

5.5.1. Feszültségmérés

A feszültségmérés megvalósítása az alsó két cella esetén nagyon egyszerű, a maximálisan 4.1 V - 4.2 V potenciálon lévő akkumulátorok pozitív felét az ECU egyik ADC bemenetére kötöm. A felső cellák pozitív felén már a sorosan kötött cellák feszültségeinek összege adódik illetve töltés esetén ennél kicsivel nagyobb feszültségszintet is mérhetünk, ezért itt egy feszültségosztóval a harmadára csökkentem az ADC bemenetére eső potenciálszintet.



5-11. ábra: Feszültségmérő-áramkör

5.5.2. Árammérés

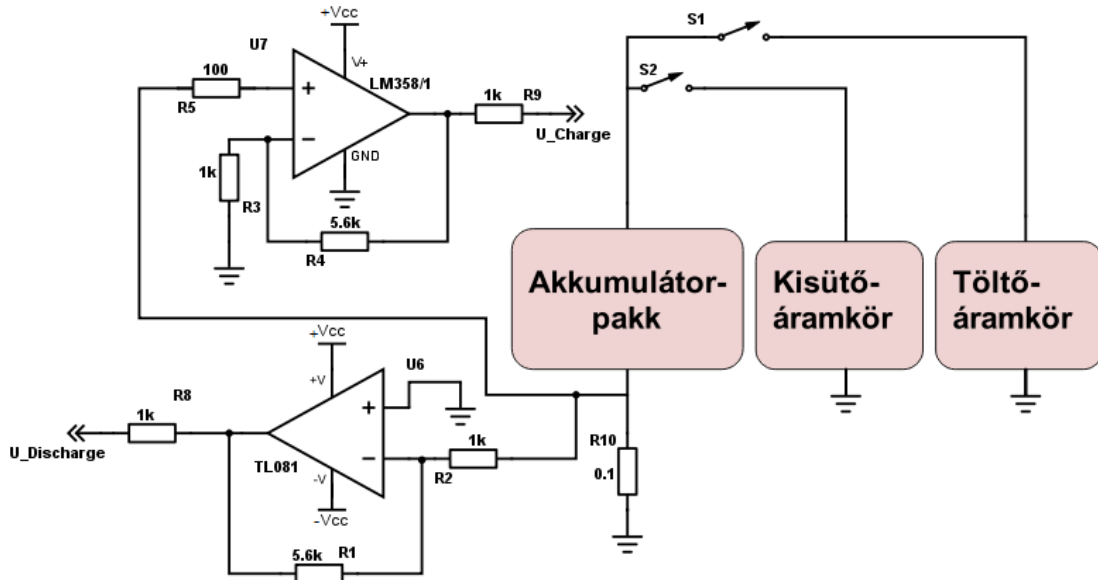
Az árammérés két részre osztható, kisütési- és töltési áram mérésére. Az akkumulátor áramait úgy számoljuk, hogy a föld és az akkumulátorpakk negatív polaritású elektrodája közé egy söntellenállást rakunk, amin mérjük a feszültséget, és ebből ki tudjuk számolni a szükséges áramértéket.

Az ellenállásnak kellőképp kicsinek és nagy pontosságúnak kell lennie. Ez azért fontos, hogy az ellenálláson ne disszipáljon el túl sok energia nagy áramok esetén, és hogy pontosan tudjunk mérni. $100\text{ m}\Omega$ nagyságú, 5%-os ellenállásra esett a választás. Ennél kisebb ellenállásértéket nem érdemes választani, mert az erősítők bemeneti feszültsége miatt csak a nagyobb áramokat tudnánk detektálni. Kisütés esetén az ellenállás és az akkumulátorpakk közötti potenciál negatív lesz a földhöz képest, töltés esetén pedig pozitív. A töltési áram méréséhez egy neminvertáló erősítő alkapcsolással, a kisütési áram esetén pedig egy invertáló alkapcsolással mérjük a söntre eső felerősített feszültséget.

A töltési áram méréséhez egy Texas Instruments LM358 típusú aszimmetrikus tápellátású műveleti erősítőt használtam. Az erősítő áramkör erősítet körülbelül 6.6-szerre választottam. A töltési áram maximum 3 A erősségű lesz az előzetes tervek szerint, ekkor az ECU bemenetére $0.1\ \Omega \cdot 3\ \text{A} \cdot 6.6 = 1.98\ \text{V}$ kerül. Ilyen erősítés mellett 7.5 A-es tranziens töltő áramot még fel tudunk dolgozni az 5 V-os ADC-kkel és nem terheljük meg a bemeneteket nagy feszültség értékekkel.

A kisütési áramméréshez a Texas Instruments TL081 típusú szimmetrikus tápellátású műveleti erősítőt használtam. Mivel szimmetrikus labortáp nem állt rendelkezé-

semre, ezért két db 9 V-os elemről állítottam elő a pozitív és negatív tápfeszültséget. Kisütési áram értéke nagyobb lehet, mint a töltési áramé, ezért az erősítő nem invertáló alapkapcsolásában nagyjából 5.6-es erősítést állítottam be. Így 9 A-es áramfolyás esetén mérnénk az ECU bemenetén a maximálisan mérhető 5 V-os feszültségszintet.



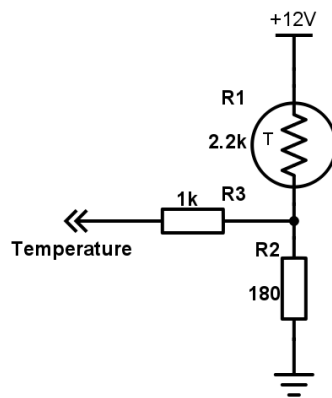
5-12. ábra: Árammérő-áramkör kapcsolási rajza

5.5.3. Hőmérsékletmérés

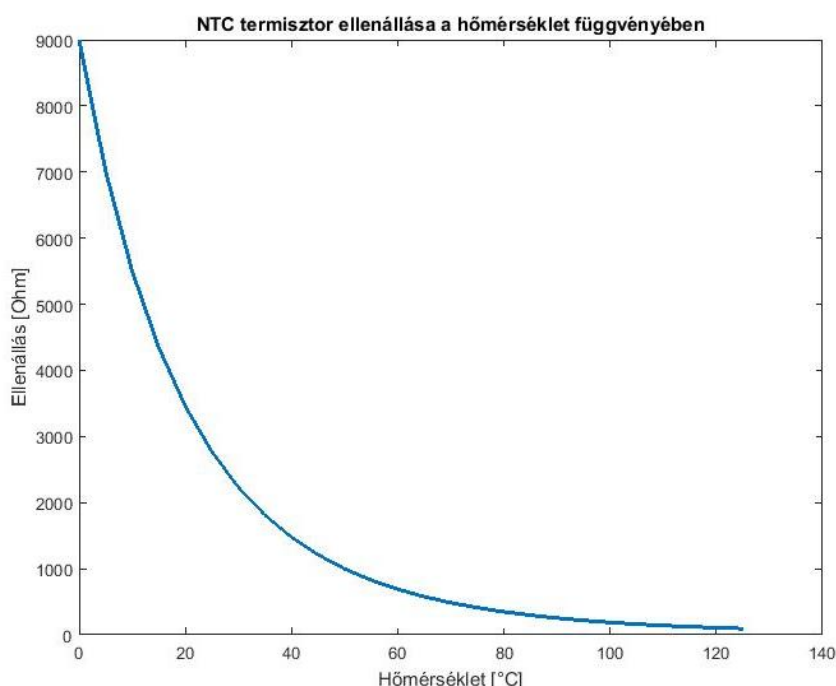
A hőmérsékletmérést Vishay gyártmányú 2381 640 90059 típusú, 2.2 k Ω ellenállású NTC termisztorok segítségével végzi az áramkör (5-13. ábra). A két termisztorot hővezető ragasztóval rögzítettem a cellákhoz. Az NTC termisztor ellenállása hő hatására csökken (5-14. ábra). Egy feszültségosztás után megkapjuk a kimeneti feszültséget, ami függ a termisztor ellenállásától és ezáltal a hőmérséklettől:

$$U_{temp} = V_{cc} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{termisztor}} \quad (5.21.)$$

A feszültségosztó ellenállást (R_2) úgy kell megválasztani, hogy az ECU bemenetére érkező feszültségszint ne lépje túl az 5 V-ot. Az akkumulátorcellák kisütése esetén legnagyobb megengedhető hőmérséklet 60°C. Ekkor a termisztor ellenállása 689 Ω . Az ellenállás megválasztásánál számoltam egy 50%-os biztonsági rátával, ha valami hiba folytán mégse tudna lekapcsolni az áramkör. Így ha $R_2 = 180 \Omega$, akkor 90°C-os hőmérséklet esetén fog 5 V kerülni az ECU bemenetére.



5-13. ábra: Termisztoros hőmérés kapcsolási rajza



5-14. ábra: Vishay 2381 640 90059 típusú, 2.2 k Ω ellenállású NTC termisztor ellenállás karakterisztikája a hőmérséklet függvényében 54 [18]

5.6. Cellák védelme

Amíg nincs zárva a főkapcsoló relé, addig nem tudja ellátni az áramkör az alapvető funkcióit, beleértve az áram és feszültségmérést. A relét szoftveresen tudjuk vezérelni. A főkapcsoló az akkumulátorpakk negatív elektródája és a föld között helyezkedik el, pontosabban az akkumulátor és az olvadóbiztosíték között.

Túláram ellen több különböző módon is védve van az áramkör. Cellánként fel van forrasztva egy 6 A-es 60 V-ot elbíró Littelfuse gyártmányú 30R600UF típusú polyfuse. Ha a polyfuse-on átfolyó áram erőssége megközelíti a határértékét (6 A-t), akkor az el-

lenállása nagyon meredek karakterisztikával nőni kezd, míg az áramkör számára szakadásba nem megy át. Használat után rövid pihentetési idő után visszanyeri eredeti vezető tulajdonságát, így egyfajta áramkorlátként működik.

Másik védekezési mód az olvasóbiztosíték, mely a nagy áram esetén megolvad és megszakítja az áram folyását. A biztosíték az akkumulátorpakk és a föld között helyezkedik el és biztosítéktartó az áramkörbe van forrasztva, így könnyen cserélhető a különböző alkalmazás függvényében (jelenleg 15 A-es üvegbiztosíték van a foglalatban).

Harmadik védekezési mód a szoftveres védelem. Folyamatosan mérjük a cellák áramfelvételét és leadását. Ha a mért érték magasabb, mint amit biztonságosan elbírna az akkumulátor, akkor egy analóg jellel vezérelt relével leválasztjuk az akkumulátorcellákat az áramkörről és megszakítjuk az aktuálisan futó folyamatot.

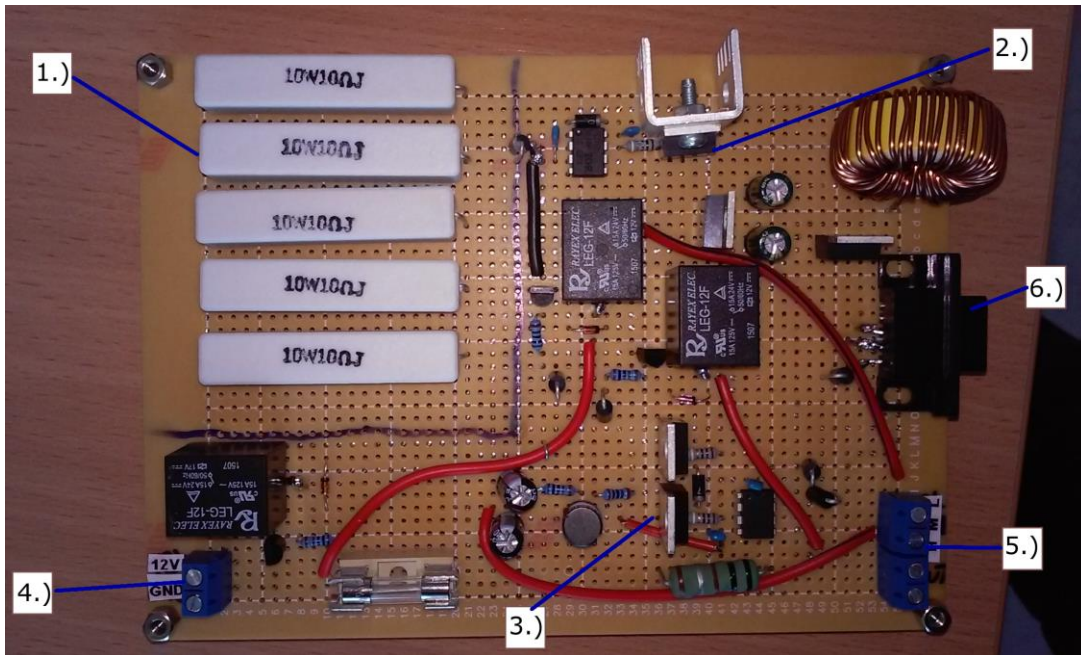
Túlmelegedés ellen hőrelével is védhetnénk az akkumulátorcellákat, melyek egy adott hőmérsékleten leoldanak, és lekapcsolják az akkut a rendszerről. Azonban nem sikerült olyan hőrelét találnom, amelynek a leoldási hőmérséklete ne lenne jóval az akkumulátor biztonságos üzemi hőfokának felső határa felett (töltés esetén 45°C , kisütés esetén 60°C), illetve itt az is probléma, hogy más-más hőmérsékleten kellene működésbe lépnie töltés és kisütés esetén, ami nem lehetséges. Az áramkörömben az akkumulátor hőmérsékletét NTC termisztorok (**5-13. ábra**) segítségével mérhetjük, és ennek függvényében használhatunk itt is elektromos kapcsolókat.

Túltöltés és mélykisütés ellen az akkumulátorcellák feszültségének folyamatos mérésével tudunk védekezni. Ha a cella feszültsége a gyártó által előírt maximálisan megengedhető feszültségszint felé kerülne, akkor azonnal lekapcsoljuk a töltést és kisütjük a cellát a biztonságos feszültségtartományú szintre. Ha pedig elérnénk az alsó határát a biztonságosan használható feszültségtartománynak, akkor relé vagy FET kapcsoló segítségével megszakítjuk a kisütést.

5.7. Az elkészített áramkör

Az áramkört a két elkülöníthető próbapanelra szedtem szét, teljesítmény- és mérőáramkörre. A teljesítményáramkörre került a töltéskiegyenlítő áramkör, kisütőáramkör és a töltőáramkör, a mérőáramkörre pedig a feszültség-, áram- és hőmérsékletmérést megvalósító elektronika került. Így a mérőáramkörben nem folynak nagy áramok, emiatt kisebb valószínűséggel kerülhet az ECU bemenetére nagy feszültség vagy áram, valamint kisebb zajt is tapasztalhatunk a mérések során.

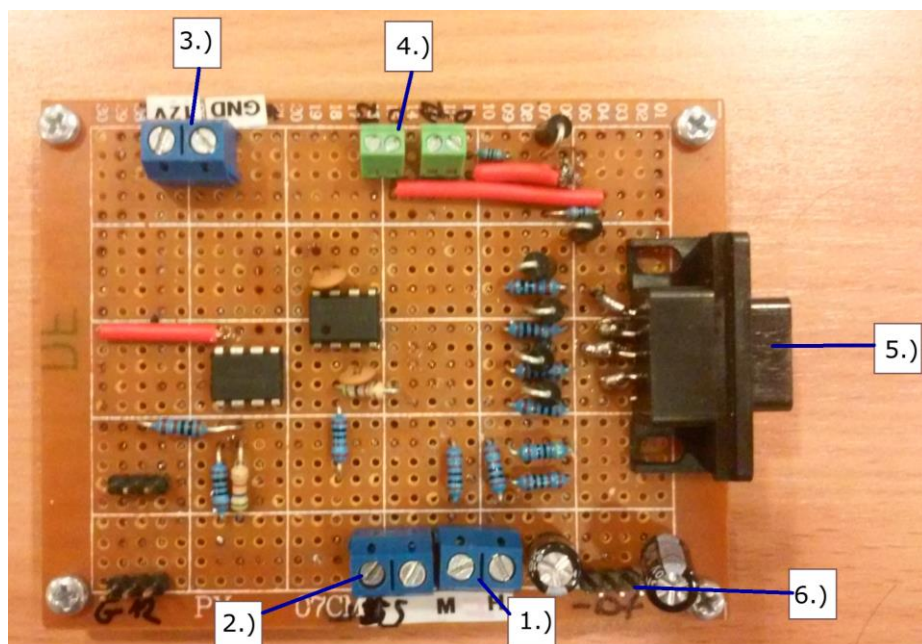
5.7.1. Az elkészített teljesítményáramkör megvalósítása



5-15. ábra: Akkumulátorfelügyelti rendszer hardverének teljesítményáramköre

- 1.) Kisütőáramkör
- 2.) Töltőáramkör
- 3.) Töltéskiegyenlítő áramkör
- 4.) Föld és táp csatlakozók
- 5.) Akkumulátorpakk csatlakozók
- 6.) Bemeneti vezérlőjelek

5.7.2. Az elkészített mérőáramkör megvalósítása



5-16. ábra: Akkumulátorfelügyelti rendszer hardverének mérőáramköre

- 1.) Akkumulátorpakk csatlakozói
- 2.) Árammérő csatlakozója (söntellenálláson eső feszültség)
- 3.) Föld és táp csatlakozók
- 4.) Termisztor csatlakozók
- 5.) Az áramkör kimenetei
- 6.) Szimmetrikus tápellátás csatlakozói

6. Szoftveres megvalósítás

6.1. Használt fejlesztői szoftverek

Az akkumulátorfelügyeleti rendszer MATLAB/Simulink környezetben készült, MotoHawk tool felhasználásával. A környezet lehetőséget nyújt a grafikus programozásra, így gyorsan és szemléletesen hozhatunk létre programokat. A MotoHawk eszköztár könyvtárai különböző diagnosztikai, kalibrációs és kommunikációs port blokkokat tartalmaznak. A tool az elkészült program lefordításához beépített fordítót használ. Segítségével az elkészült program nem csak a személyi számítógépeken futtatható, hanem rátölthető a csatlakoztatott hardverekre is, ezáltal lehetővé téve a valódi környezetben történő tesztelést [11]. Az általam használt MotoHawk blokkok az ECU-n futó program paramétereinek valós időben történő megfigyelését és kalibrálását teszik lehetővé, továbbá az ECU be- és kimeneteit tudják kezelni.

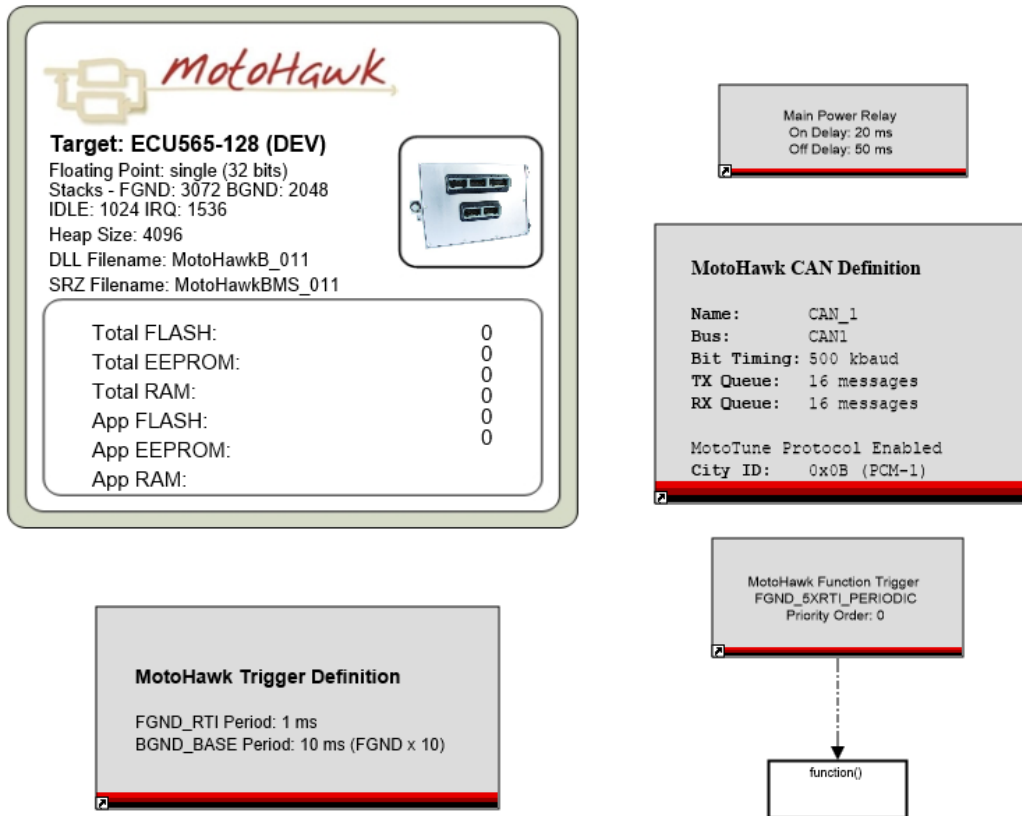
A MotoHawk-hoz tartozik a MotoTune ECU Calibration Tool, mely a rendszer kalibrációs szoftvere. A MotoTune segítségével tudjuk feltölteni az elkészült programot a vezérlő egységre. A programunkba beépített kalibrációs blokkokban megjelölt paramétereket futás közben tudjuk módosítani, így a tesztelés során nem kell minden egyes módosítás után újratölteni az ECU-ra a programot, ez nagymértékben lecsökkenti a fejlesztési időt. A kijelző-blokkok segítségével különböző állapotjelzők értékeit monitorozhatjuk és meghatározott mintavételezési idővel napló fájlba menthetjük őket.

6.2. A szoftver felépítése

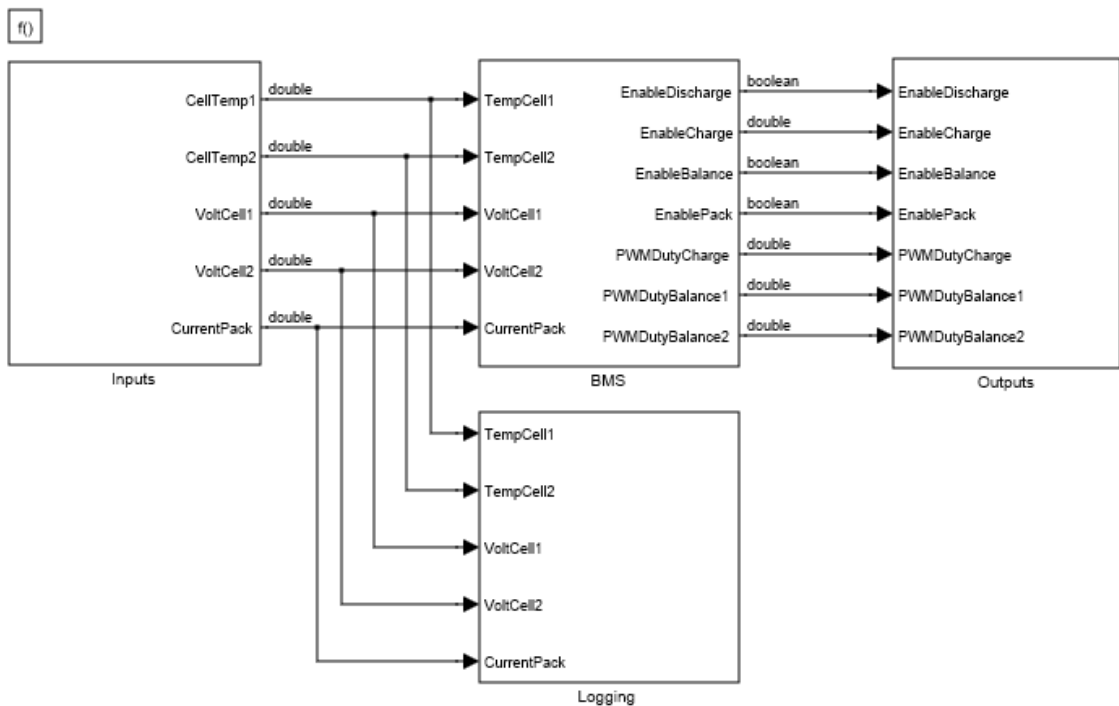
A MotoTron rendszer használatához szükséges a modell legfelső szintjén definiálni az ECU típusát, az ECU és a számítógép által használt kommunikációs protokollt és annak paramétereit, illetve azt, hogy milyen időközönként futtassa a program a fő blokkban elhelyezett modelleket (**6-1. ábra**). Ezek az egységek a MotoHawk könyvtáraiban előre meg vannak határozva. A tesztek során 10 ms-os időközönként fog lefutni a program.

A fő blokk 4 részegységre osztható (**6-2. ábra**):

- Inputs: bemenetek,
- BMS: szabályzás és vezérlés,
- Logging: bemenetekből számított paraméterek kijelzése,
- Outputs: kimnetek.



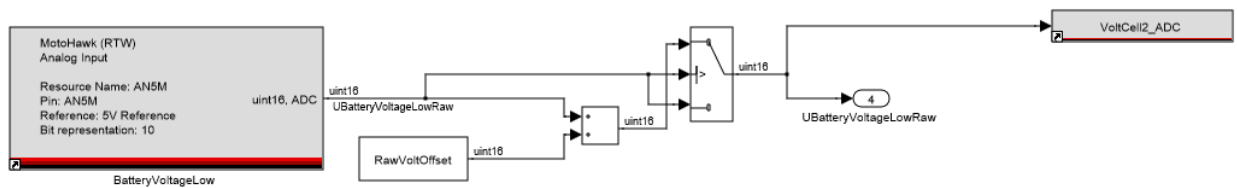
6-1. ábra: A MotoTron-nal megvalósított MATLAB/Simulink modell legfelső szintje



6-2. ábra: A megvalósított szoftver felépítése a második szinten

6.2.1. Inputs

Az Inputs subsystem-ben egy analóg-digitális konverzió után a MotoHawk blokkokkal olvassuk ki az ECU bemenetein érkező feszültség szinteket. Ezekben a blokkokban meg lehet adni, hogy melyik bemenetről szeretnénk beolvasni, mekkora legyen a referencia feszültség, és hogy hány bites legyen a kiadott szám. A motorvezérlő egység 10 bites ADC-ket használ, így 0 és 1023 közötti egész számokat kapunk, ahol az 5 V feleltethető meg az 1023-nak és a 0 V a 0-nak. A bemeneteken nullánál nagyobb bemeneti feszültség esetén van egy -9 bit körüli offset, amit a kiértékelés előtt hozzáadunk a bemenetekhez (6-3. ábra).



6-3. ábra: Alsó két akkumulátorcella feszültségének beolvasása

Mivel, a BMS subsystem feszültség- (V), áram- (A), és hőmérsékletértékekkel (°C) dolgozik, ezért a 10 bites értéket át kell számítanunk. Így a szoftveres digitális-analóg átszámításkor a bemeneten érkező számot megszorozzuk 5/1023-dal.

6.2.1.1. Hőmérsékletmérés szoftveresen

A hőmérsékletmérőhöz tartozó bemenetek feszültségéből számítjuk az NTC termisztor ellenállását, majd az NTC ellenállás-hőmérséklet karakterisztika (5-14. ábra) inverze segítségével ki tudjuk számítani a cellák hőmérsékletét. Az ECU-ba beérkező feszültség értéke:

$$U_{temp} = V_{cc} \frac{R_2}{R_2 + R_{termisztor}}, \quad (5.21.)$$

ahol $R_{termisztor}$ az NTC termisztor ellenállása, R_2 egy fix ellenállás, mely a multiméteres mérések alapján 174Ω (180Ω helyett) és V_{cc} pedig a tápfeszültség, vagyis 12 V. Ebből az egyenletből $R_{termisztor}$ értéke:

$$R_{termisztor} = \frac{R_2}{U_{temp}} (V_{cc} - U_{temp}). \quad (6.1.)$$

Ezek után a termisztorok ellenállásának értékéből az NTC adatlapján megadott ellenállás-hőmérséklet karakterisztika (5-14. ábra) inverzébe behelyettesítve ki tudjuk számolni a hőmérsékletet. Ehhez a művelethez a MATLAB/Simulink 1-D lookup table blokkjába vettem fel a karakterisztikát. A mérések során kisebb eltérések adódtak az elméleti karakterisztikához képest, és a két NTC termisztor ellenállása sem egyezett meg

pontosan azonos hőmérsékleten. A helyes hőmérséklet meghatározásához kísérleti úton korrigálni kellett a számított értékeket. A hőmérséklet korrigálásáról a lookup table ki-menetén elhelyezett erősítő blokk gondoskodott 0.90667-es erősítéssel.

6.2.1.2. Feszültségmérés szoftveresen

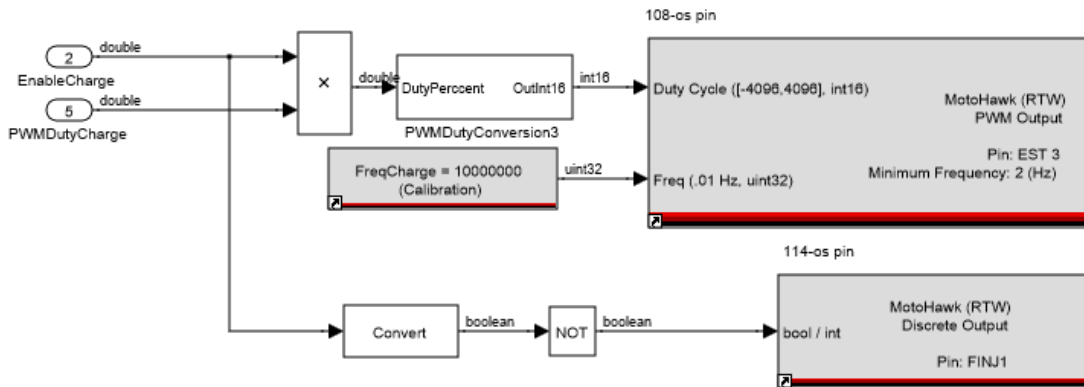
A kisebb potenciálon lévő két cella esetén a cellák pozitív fele van rákötve az ECU-ra feszültségosztás nélkül. A motorvezérlő egységen az ADC-k a föld potenciálhoz képest mérik a feszültség szintet. Az akkumulátor és a föld közé van kapcsolva egy sön-tellenállás, egy olvadóbiztosíték és egy relé. Tehát ha pontos értéket szeretnénk kapni, akkor a mért értékből le kell vonni a föld és az akkumulátor negatív fele között eső fe-szültséget. Ez a feszültség függ az áramtól, amit a söntellenálláson mérünk, valamint a föld és az akkumulátor negatív elektródája közti elemek ellenállástól, amely eredő ellen-állása körülbelül 183 m Ω értékű. Ezen felül a mérőáramkör pontatlanságainak kiküszöbő-lésére egy 1.047-es szorzóval van ellátva a bemeneten érkező feszültség szint.

A felső két cella feszültségét úgy kapjuk, hogy levonjuk az akkumulátorpakk po-zitív elektródájának feszültségéből az alsó akkumulátorcellák pozitív elektródján mért fe-szültségét. A akkumulátorpakk pozitív elektródája egy harmadoló feszültségosztón ke-resztül van az ECU-ra kötve, ezért a mért értéket a szoftverben vissza kell szorozni a feszültségosztás mértékével. Mérések során kiderült, hogy a feszültségosztás $\frac{U}{3.14}$ lett $\frac{U}{3}$ helyett, így a programban már ez a szorzás érték lett meghatározva.

6.2.1.3. Árammérés szoftveresen

Áramméréshez a söntellenálláson eső felerősített feszültség érkezik a bemeneten. Töltési árammérés esetén ez a feszültség szint nagyjából a 6.6-szeresére, kisütési áram-mérés estén pedig kb. 5.6-szeresére van felerősítve. Mérések során kiderült, hogy az el-lenállások és a műveleti erősítők pontatlansága miatt az erősítés töltésnél 6.37, kisütésnél 5.45. Ahhoz, hogy megtudjuk az áramerősség értékét, le kell osztanunk a feszültség zin-tet az erősítéssel és a söntellenállással, melynek értéke 0.1 Ω .

6.2.2. Outputs



6-4. ábra: Részlet az Outputs subsystem-ből, töltőáramkörhöz PWM és diszkrét kimeneti blokkok

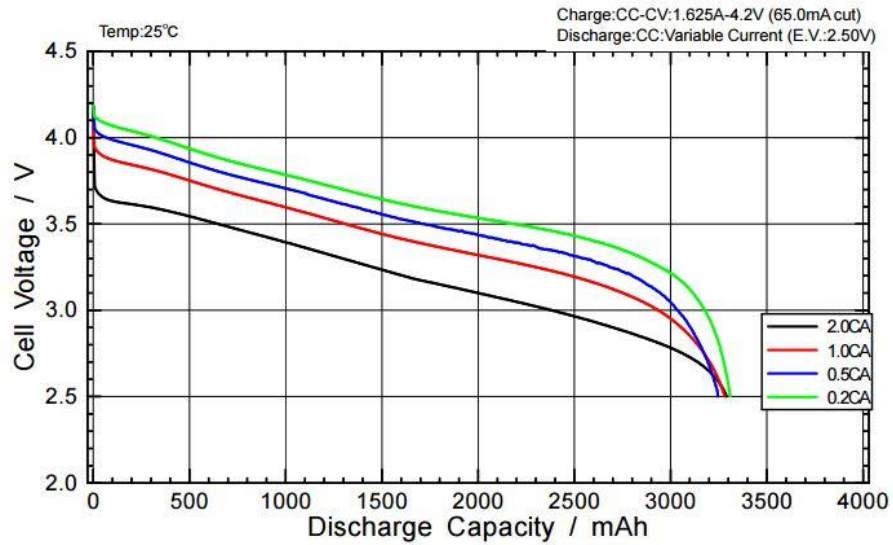
Az Outputs subsystem-ben (6-4. ábra) vannak definiálva a MotoHawk kimeneti blokkok, három PWM kimenet (kettő a balanszolóhoz, egy pedig a töltőáramkörhöz), illetve három darab analóg jel a relék bekapcsolásához (a töltőáramkört, a kisütőáramkört és a teljes áramkört bekapcsoló relék). A PWM blokknak meg lehet adni bemenetként a kitöltési tényezőt előjeles 13 bites szám formájában, ahol a 4095 a 100%, -4095 a -100% és 0 a 0%, valamint a PWM frekvenciáját 0.01 Hz pontossággal. A relé vezérlő jelekhez diszkrét kimenetet használtam, mely fixen magas vagy alacsony jelszintet tud kiadni. A blokkokon belül állítani lehet, hogy az ECU melyik kimenetén küldje ki a jeleket. A BMS subsystem-ből érkező PWM kitöltési tényezője egy 0 és 1 közötti érték ezt a modellt konvertálja át a MotoHawk blokk számára hasznos tartományba.

6.2.3. Logging [17]

A Logging és a BMS subsystem-et (6.2.4. fejezet) teljes egészében Nagy Márton Tamás készítette, én ezekben az alfejezetekben csak ismertetem felépítésüket és működésüket. [17]

A Logging subsystem MotoHawk-os kijelző blokkokat tartalmaz, az átkonvertált feszültségek, áramok és hőmérsékletek számára. Ebbe a subsystem-be került bele az SOC számítás is, melynek karakterisztikáját (6-5. ábra) egy 1-D lookup table blokkba lett felvéve. Itt fontos, hogy az SOC értékét mindig az üresjárás feszültségéből számítsuk, így ha áram folyik keresztül cellákon, az áramerősség függvényében ki tudjuk számolni az üresjárás feszültséget. Ez az eltérés a cellák belső ellenállásán eső feszültség hatása. A tesztek során 25.5 mΩ belső ellenállást mértünk. Az áramerősség és a belső ellenállás szorzatát kisütéskor hozzá adjuk a mért feszültséghez, töltés esetén pedig kivonjuk.

Discharge Rate Characteristics for NCR18650B



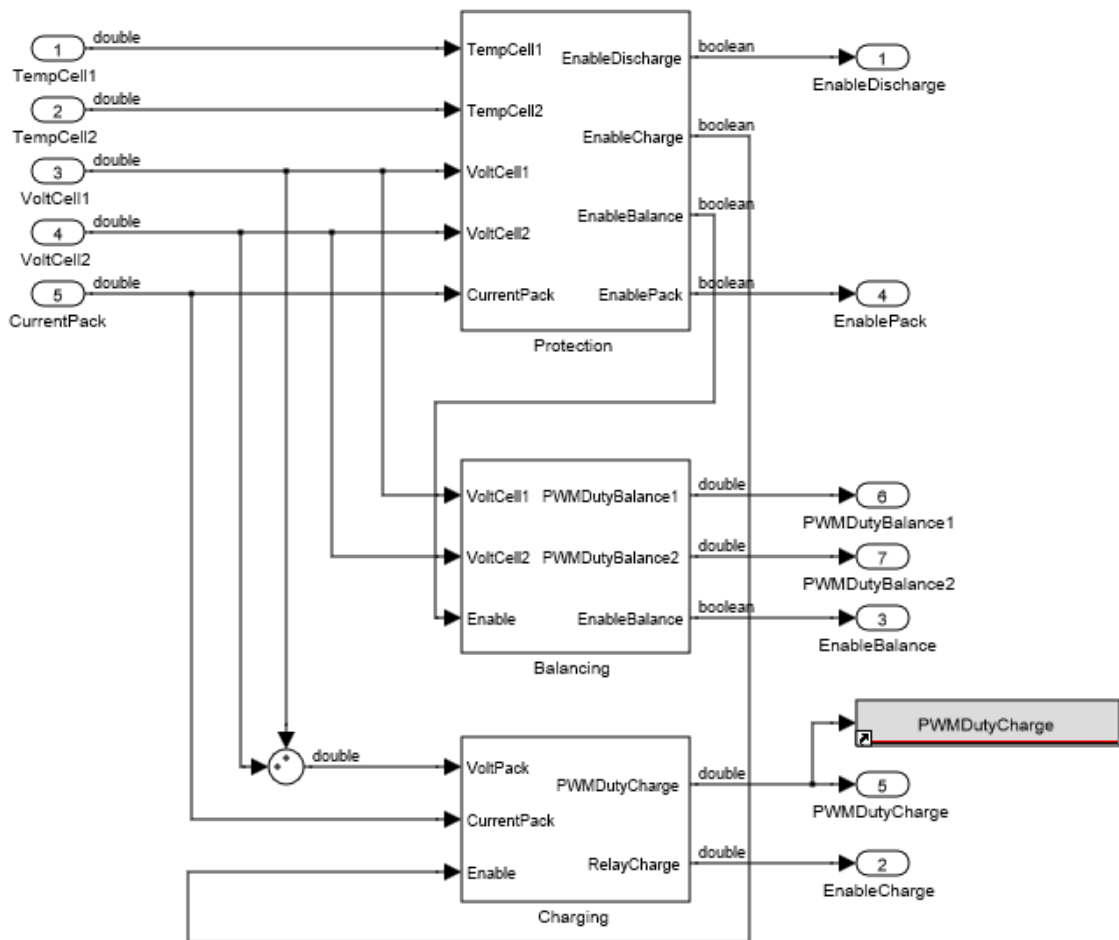
6-5. ábra: Panasonic NCR18650B kisütési karakterisztikája, cellafeszültség a kisütési kapacitás függvényében [9]

6.2.4. BMS [17]

A BMS subsystem három nagyobb részből áll (**6-6. ábra**):

- Protection: védelem,
- Balancing: töltéskiegyenlítés,
- Charging: töltés.

A BMS subsystem bemenetként a cellák feszültségét, áramát és hőmérsékletét kapja meg. Kimenetei pedig a PWM-ek kitöltési tényezői és engedélyező jelei, illetve a relé vezérlő jelek.



6-6. ábra: BMS subsystem felépítése

6.2.4.1. Protection

A Protection subsystem a cellák védelmét látja el szoftveres úton. A rendszer túlfeszültség, mélykisülés, túláram illetve túl nagy és túl kis hőmérséklet elleni védelemmel van ellátva. Ha bármelyik fennáll az előzőleg felsorolt problémák közül, a rendszer azonnal megszakítja a működést, az összes engedélyezőjel nulla értékű lesz, így az ECU minden általunk használt kimenete 0 V-os feszültségű lesz. Emiatt a relék kinyitnak és megszakad az áramfolyás. A rendszert ezután csak egy újraindítást követően tudjuk ismét elindítani.

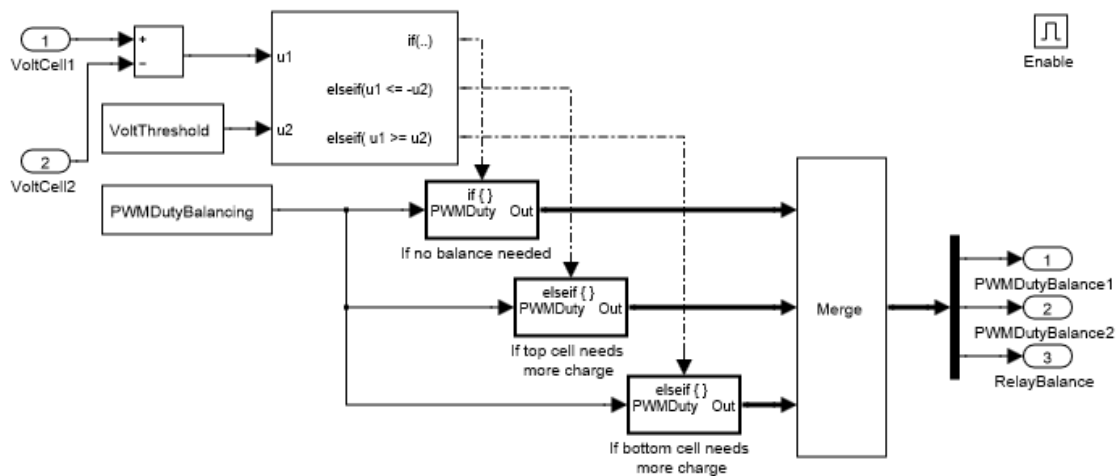
A szoftverben meghatározott küszöbértékek:

- Maximális hőmérséklet = 40°C,
- Minimális hőmérséklet = 5°C,
- Maximális cellafeszültség = 4.2 V,
- Minimális cellafeszültség = 2.5 V,
- Maximális töltőáram = 3.25 A,
- Maximális kisütőáram = 13 A.

6.2.4.2. Balacing

A Balancing subsystem bemenetként megkapja a cellák feszültségét és egy balansz engedélyező jelet, mely a Protection blokk kimenete. A töltéskiegyenlítés csak akkor léphet működésbe, ha az engedélyezőjel „1”-es értékű.

Az algoritmus először összehasonlítja a cellák feszültségét. Ha a feszültségek közti különbség kisebb, mint egy előre meghatározott érték (0.1 V), akkor a kimenetek nulla értékűek lesznek. Ha viszont a feszültségszintek közti különbség nagyobb, mint az előre meghatározott érték, akkor engedélyezzük a töltéskiegyenlítést és a magasabb töltöttségi szinten lévő cellához tartozó 80 kHz-es 40%-os kitöltési tényezőjű PWM jelet bekapcsoljuk.



6-7. ábra: Balance subsystem, töltéskiegyenlítő szoftver modellje

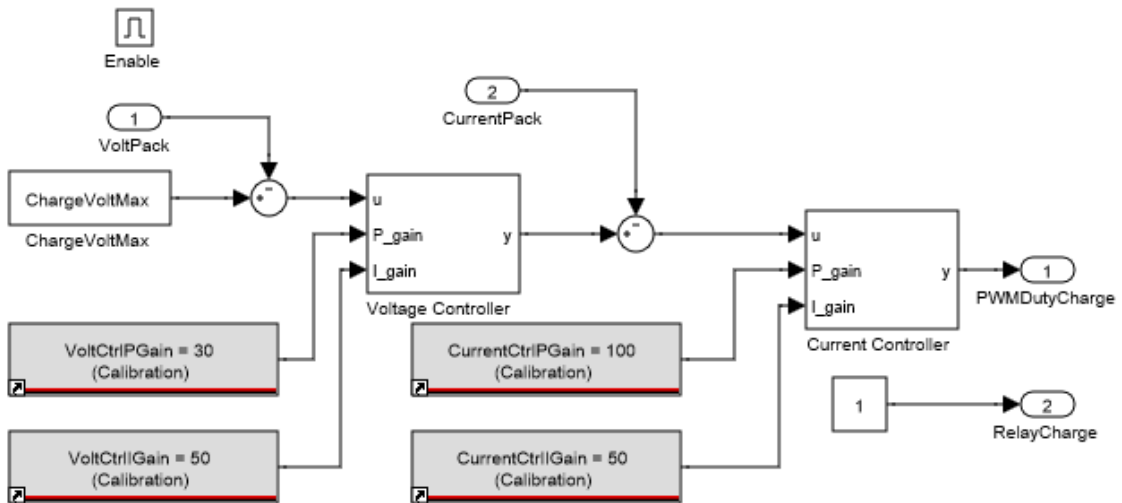
6.2.4.3. Charging

A Charging subsystem-ben a töltés szoftveres vezérlése került implementálásra. A vezérlő képes konstans áramú és konstans feszültségű működésre egyaránt (2-5. ábra). A modell bemenete az akkumulátor feszültsége és árama, valamint egy engedélyező jel, ami szintén a Protection blokknak a kimenete. A modell kimenete pedig a töltő áramkört engedélyező relé vezérlőjele és egy szabályozható kitöltési tényezőjű PWM, amivel a töltőáramkör FET-jét hajtjuk meg.

A töltő algoritmus megvalósítása egy kaszkádszabályozó (6-8. ábra) segítségével történik, amely két diszkrét idejű PI szabályzóból áll. A belső kör az áramszabályozó, amely a töltőáramkör MOSFET-jének Gate elektródjára kerülő 100 kHz-es PWM megfelelő kitöltési tényezőjéért felelős. Az áramszabályozó alapjele egy áram referencia jel, amit a feszültség szabályzó állít elő a kimenetén. A külső kör szabályozza a feszültséget és nem engedi az akkumulátorpakk feszültségét egy küszöbérték fölé.

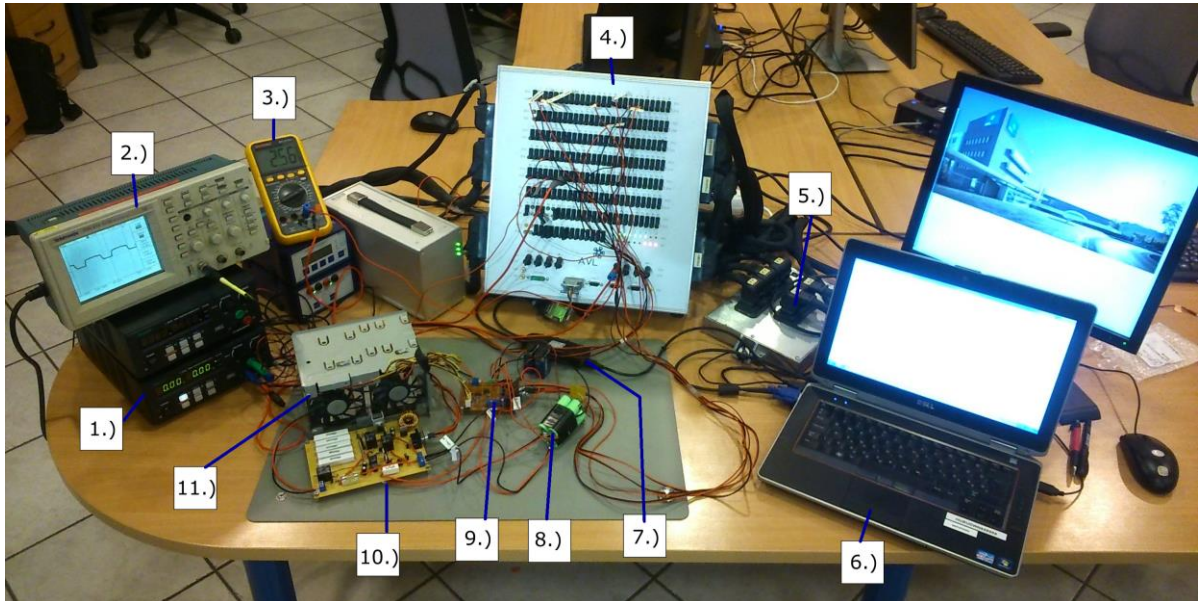
A töltés kezdeti fázisában a feszültségszabályzó kimenete szaturálni fog, és a maximális töltési áramot (2 A) adja ki az áramszabályzó számára. Ez a konstans áramú töltési szakasz. Ha a feszültségszabályzó integrátora kap egy anti-windup beavatkozó jelet, akkor az integrátor visszaáll alaphelyzetbe, ekkor a szaturáció véget ér. A szabályzó helyesen tud működni anélkül, hogy túllövést okozna.

Amikor a feszültségszabályzó eléri a maximális töltő feszültséget kijön a szaturációból és az áramszabályzó referencia alapjel elkezd csökkenni. Ez a konstans feszültségű töltési szakasz. Addig tart ez a folyamat, amíg az áram értéke el nem ér egy előre meghatározott minimális értéket (0.6 A). Fontos a DC/DC konverter számára, hogy elkerüljük a szakaszos áramú táplálást. Amikor elértük a minimális áramértéket, a töltési folyamat véget ér.



6-8. ábra: Töltőáramkör vezérlését megvalósító kaszkádszabályzó

7. Tesztelés



7-1. ábra: Akkumulátorfelügyeleti rendszer tesztelése, mérési elrendezés [17]

- 1.) Manson SSP-8160 feszültségforrás
- 2.) Tektronik TDS210 oszcilloszkóp
- 3.) Maxwell MX-25304 digitális multiméter
- 4.) Break Out Box (BOB)
- 5.) ECM-0565-128-0702-C ECU
- 6.) Számítógép
- 7.) A BOB-ot és a fejlesztő számítógépet összekötő CAN-Bus interface
- 8.) Akkumulátorpakk
- 9.) Akkumulátorfelügyeleti rendszer mérőáramköre
- 10.) Akkumulátorfelügyeleti rendszer teljesítményáramköre
- 11.) Hűtőventillátor

Az akkumulátorfelügyelet rendszer tesztelését és kalibrálást Nagy Márton Tamással közösen végeztük, mivel ő alkotta meg a szoftver jelentősebb részét (a szoftveres védelmet, a töltő algoritmust, és a töltéskiegyenlítő szoftverét) én pedig az áramkört és a keretrendszoftvernek azon részét, mely kapcsolatot létesít a külvilággal.

7.1. MotoTron Developer ECU ki- és bemeneteinek megválasztása

A tesztelés során összeillesztettük a hardvert a szoftverrel, és megvizsgáltuk az egyes részáramkörök működését. Az első problémával akkor találkoztunk, amikor elkezdtük megvizsgálni a motorvezérlő bemeneteit. Az ECU ADC bemenetei nem voltak

egyformák, és máshogyan működtek, mint ahogyan azt elvártuk volna. Az ECU különböző típusú ADC-ket használ potenciométerek, nyomás szenzorok, változó ellenállású szenzorok és oxigén szenzorok illesztésére. Így az alkalmazott eszközök függvényében választhatjuk ki a nekünk szükséges ADC bemenetet. Érdekes módon az azonos típusú bemenetek között is találtunk eltéréseket. Célunk az volt, hogy találjunk hat egymáshoz nagyon hasonló ADC-t, melyek használatával a lehető legkevesebbet kell módosítani a szoftveren. A termisztoros hőmérőknek a változó ellenállású szenzorokhoz készült ADC-ket használtuk. A maradék négy feszültségjelhez viszont csak három azonos elven működő 10 bites bemenetet találtunk. Ez azt jelenti, hogy a kisütési- és töltési áramhoz tartozó feszültség szintet egy ADC bemeneten tudjuk mérni, az alkalmazás függvényében változtatva, hogy melyik van bedugva a motorvezérlő egység break out box-ába. A cellák feszültség szintjeit pedig két külön bemenetként tudjuk kezelni.

Ezek után következhetett az ECU kimeneteinek a kiválasztása. A relévezérlő jeleknél három egyforma diszkrét kimenetet használunk, melyek logikai magas (12 V) vagy logikai alacsony (0 V) értéket tudnak kiadni, a kimenetek negált logikájúak, ezért a tesztmodellben a MotoHawk-os kimenetei blokkok bemenetéhez invertáló egységet helyeztünk. A PWM jelekhez három maximálisan 100 kHz-es 5 V-os impulzusszélesség-modulált jel kibocsátására képes kimenetet használtunk. Továbbá megfigyeltük, hogy a kimeneteken elérhető PWM-ek minimális kitöltési tényezője 5 μ s. Ez azt jelenti, hogy 100 kHz-es frekvencia esetén a kitöltés tényező 50%.

A kimeneti frekvencia kisebb és a kitöltési tényező nagyobb, mint amivel a hardver tervezése során számoltam, ebben az esetben a balanszármkör tekerese telítődne, és rövide zárná a magasabb töltöttségű cellákat. Emiatt töltéskiegyenlítő áramkör kisebb módosításra szorult. A tekercs induktivitásának növelésével csökkenthetjük a tekercsen átfolyó áram csúcsértékét. A 2.2 μ H induktivitású tekercsel sorosan kapcsoltam egy 3.3 μ H-s tekercset (BOURNS RLB1314-3R3ML), így az eredő induktivitás már 5.5 μ H-nek adódott. A töltéskiegyenlítő MOSFET-jeit vezérlő PWM jeleket 80 kHz-esre csökkentettük, hogy 40%-os kitöltési tényezőt el tudjunk érni. Ez amiatt fontos, hogy az áramkör tranzienseinek legyen elég ideje lecsengeni. Az (5.20.) egyenletből kiszámítva a tekercs áramának csúcsértéke legfeljebb 3.6 A-nek fog adódni, és a cellák töltési árama így 0.5 C környékén fog maradni.

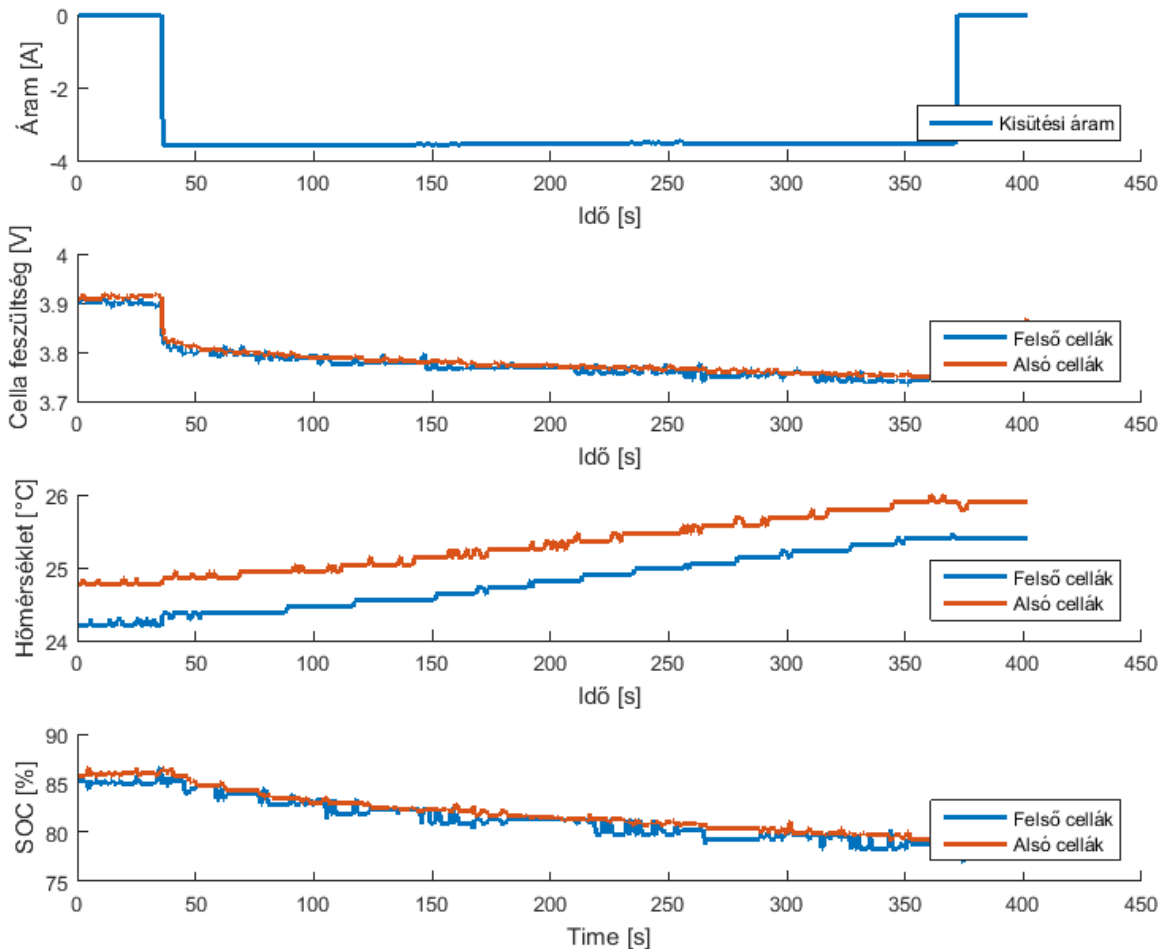
7.2. Mérőáramkör tesztelése

Ahhoz, hogy a feszültség- és az áramértékeket mérni tudjuk, be kell kapcsolni a főrelét. Ezek után a MotoTune szoftverben megfigyelhettük a bemeneteken kapott 10 bites számokat és az ezekből számított feszültség-, áram-, és hőmérsékletszinteket. Kezdetben igen pontatlan értékeket figyeltünk meg a képernyőn. A számított értékeket empirikus úton korrigáltuk, hogy minél nagyobb bemeneti tartományban érvényesek legyenek. A kalibrációt a **6.2.1. Inputs** fejezetben már részletesen kifejtettem, így itt nem térnék ki rá újra.

7.3. Kisütőáramkör tesztelése

A kisütőáramkör teszteléséhez be kell kapcsolni a főrelét, majd a kisütőáramkörhöz tartozó relés kapcsolót, hogy megindulhasson az áramfolyás.

7.3.1. 5 perces kisütés teszt



7-2. ábra: 5 perces akkumulátor kisütés teszt grafikonjai

Először azt vizsgáltuk, hogy kisütés közben hogyan változnak a számított paraméterek. Ehhez egy 5 perces kisütés tesztet végeztünk. A mért értékeket a MotoTune szoftver fájlba mentette 50 ms-os mintavételi idővel. A mért értékeket a **7-2. ábra** grafikonjain ábrázoltam.

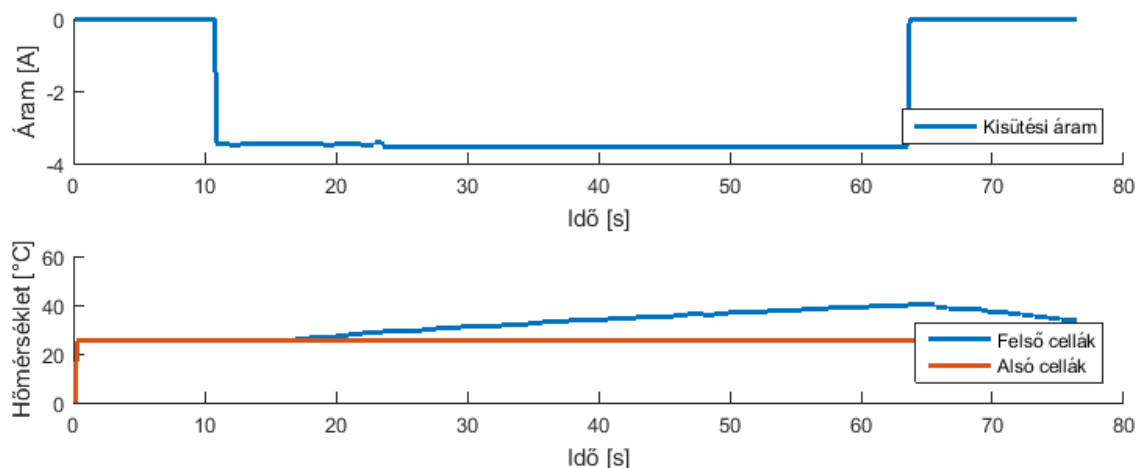
Megfigyelhető, hogy amikor a kisütést engedélyező relé bekapcsol, a cellák feszültsége leesik körülbelül 0.1 V-tal. Ez a feszültségesés az akkumulátorcellák belső ellenállásán átfolyó áram hatása. Az 5 perces merítés alatt a cellák töltöttségi színté körülbelül 85%-ról 79%-ra csökkent. A cellák hőmérséklete pedig a teszt során 24.2°C, illetve 24.76°C szintről 25.39°C és 25.89°C-re emelkedett.

A mérőáramkör a teszt során a vártaknak megfelelően működött.

7.3.2. Szoftveres védelem tesztelése

Kisütés közben vizsgáltuk, hogy az áramkört milyen hatékonyan tudja megvédeni a szoftver az esetleges meghibásodásoktól. Az első tesztben a maximális kisütőáram értéke 3 A-re lett állítva, a kisütést engedélyező relé zárása után azonnal beindult a védelmi funkció, és a kisütőáramkör által használt relék rögtön kinyitottak.

Második védelemi tesztben (**7-3. ábra**) a felső cellákhoz tartozó hőmérő ADC bemeneti jelét feszültséggenerátoros táplálással szimuláltuk, 25.5°C hőmérséklethez tartozó potenciálszintről emeltük a feszültséget, míg el nem érte a 40°C küszöbértékhez tartozó feszültséget. Itt az áramkör reléi szintén lekapcsoltak, és akkor sem kapcsoltak vissza, amikor a hőmérséklet már biztonságos tartományba ért.



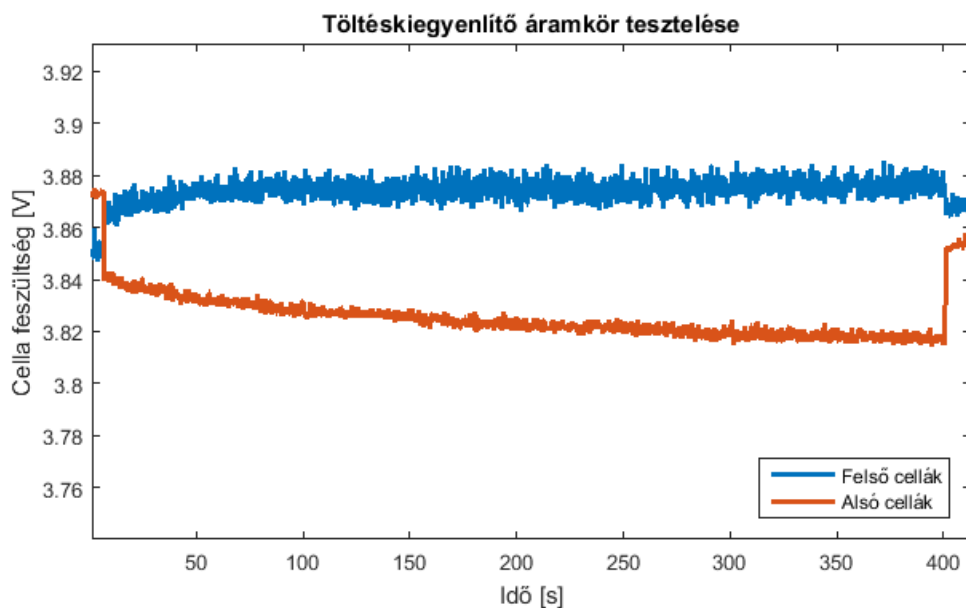
7-3. ábra: Hőmérséklet elleni szoftveres védelem tesztelés

7.4. Töltéskiegyenlítő áramkör tesztelése

A PowerPump töltéskiegyenlítés eljárás alkalmazásánál esetén nem feltétel, hogy a cellák között bármilyen feszültség különbség legyen. Tehát akár a kisebb töltöttségi szinten lévő cellákból a magasabb töltöttségűbe is vihetünk át energiát. A teszt során azt vizsgáltuk, hogy tudjuk-e növelni az egyik cella pár töltöttségi szintjét, úgy hogy közben a másikon csökken a töltöttségi szintje.

A **7-4. ábra** grafikonján láthatjuk, hogy kezdetben az alsó cellák feszültség szintje magasabban van körülbelül 3.8675 V-on, míg a felső cellák feszültsége 3.852 V. A különbség 15 mV. Ezután az alsó cellákhoz tartozó MOSFET-et meghajtottuk 40% kitöltés tényezőjű 80 kHz-es PWM-mel. Itt megfigyelhető, hogy amikor az alsó cellákon kisütés megy végbe, leesik a feszültségük. A felső cellák pedig töltődnek így az akkumulátorcellákon átfolyó áram hatására megnő a feszültségük. A balansz PWM lekapcsolása után láthatjuk, hogy sikeres volt a teszt, a felső cellák feszültsége nagyobb lett 3.8674 V, az alsó cellák feszültsége pedig kisebb 3.8522 V.

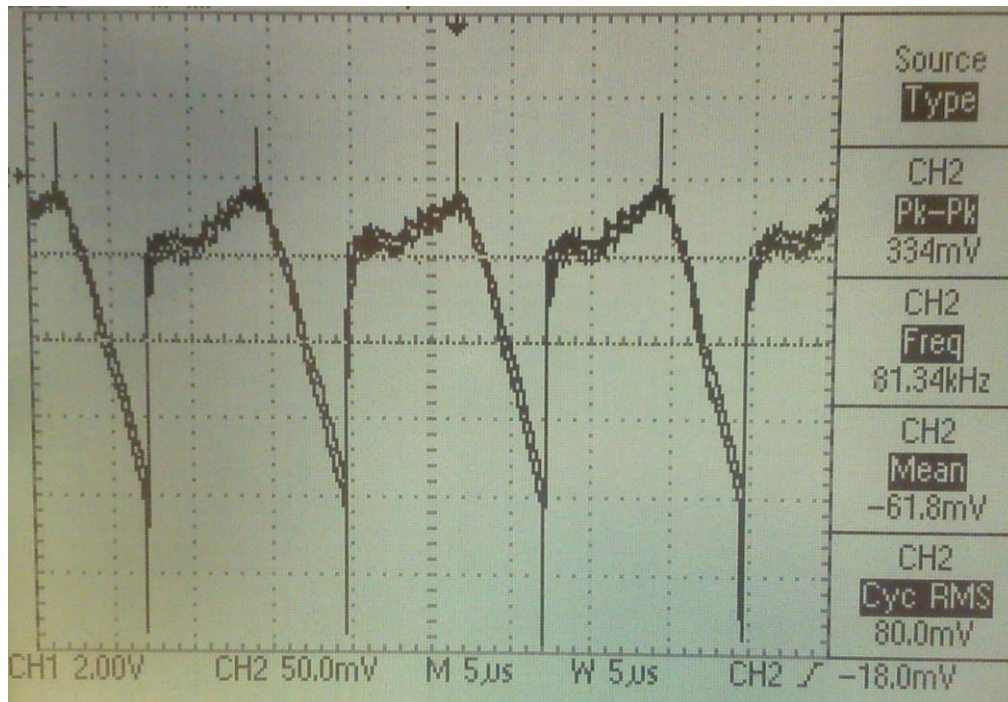
A teszt eredménye felülmúlta várakozásainkat. A töltéskiegyenlítés nagyon jó hatásfokkal működött.



7-4. ábra: Töltéskiegyenlítő áramkör tesztelése, akkumulátorcellák feszültsége az idő függvényében

A töltéskiegyenlítő áramkör működése közben oszcilloszkópon (Tektronik TDS210) mértük a sőtellenálláson eső feszültségek értékét. A sőtellenálláson eső feszültséget (**7-5. ábra**), ha elosztjuk az ellenállás értékével (0.1 Ω), megkapjuk az alsó cellák kisütőáramát. Az ábráról leolvasható, hogy, hogy 80 kHz-es frekvencián érkező

PWM esetén a söntellenálláson eső feszültség csúcserőrtéke -150 mV (leszámítva a tuskéket), vagyis 1.5 A-es kisütőáramot mérhetünk az alsó cellákon, amely feltölti a tekercset.



7-5. ábra: PowerPump töltéskiegyenlítés teszt közben a söntellenálláson eső feszültség

7.5. Töltőáramkör tesztelése

A töltőáramkör tesztelése sajnálatos módon nem hozta a várt eredményeket. A töltőáramkör MOSFET-jét meghajtó driver IC tetszőleges frekvenciájú és kitöltési tényezőjű bemeneti PWM jelre a kimenetén nem produkálta a gyárilag előírt felerősített bemeneti jelet. Ezután próbaképpen átforrasztottam a töltéskiegyenlítő áramkör driver IC-jét a töltőáramkörre. A vezetékvezetés után bekapcsoltuk az áramkört, miután váratlan fordulat történt. A balanszáramkör felső celláihoz tartozó MOSFET Gate elektródája feltehetőleg egy alkatrészlab vagy forrasztörmelék hatására tápfeszültségre került, ezért a FET nyitott állapotban rövidre zárta a felső cellákat. A cellákra erősített polyfuse-ok ellenállása a 12 A erősségű áram hatására rövid időn belül drasztikusan megnőtt, és így megóvta az áramkört és a cellákat a túláramtól.

Ezt az áramköri hibát ezidáig nem sikerült orvosolnunk. Az áramkör kijavítására a dolgozat befejezéséig sajnos már nem volt időnk.

8. Összefoglalás és továbbfejlesztési lehetőségek

8.1. Összefoglalás

Szakedolgozatom során sikerült megismerkednem az elektromos autóiparban elterjedt akkumulátortípusokkal és részletesen tanulmányoztam az akkumulátorfelügyeleti rendszerek működését.

A BMS feladatait ellátó áramkör megalkotása elsőre meglehetősen bonyolultnak tűnt, de a feladat részleteinek megvalósítása folyamán a rendszer apró elemei egy letisztult egésszé álltak össze. A megalkotott áramkör képes kiadni feszültség-, áram- és hőmérsékletértékekhez tartozó feszültségszinteket, melyekből szoftveresen ki tudjuk számítani a szükséges értékeket, továbbá a hardver segítségével tudjuk az akkumulátorcellákat kisütni és balansolni. A töltőáramkör sajnos nem működött a tesztek során.

A motorvezérlő egység bemenetein érkező feszültségértékeket a szoftver könnyen kezelhető mértékegységekké konvertálja (V, A, °C), melyek függvényében vezérelni és szabályozni tudja az áramkör működését.

A rendszer felépítése és tesztelése a Rapid Control Prototyping módszernek köszönhetően valóban nagyon hatékonynak bizonyult, élveztem a rendszerrel végzett munkát. Reményeim szerint a jövőben munkaköri keretek között is lesz lehetőségem hasonló környezetben, hasonló feladatokhoz kapcsolódó fejlesztésre.

8.2. Továbbfejlesztési lehetőségek

A tervezett áramkör nem működött tökéletesen, ezért első helyen azt említeném meg, hogy a töltőáramkört mindenképp ki kellene javítani, és az áramkör tekercsét egy gazdaságosabb, kisebb ellenállású modellre cserélném le. Ezen felül a töltőáramkör tesztelés során fellépett hiba jövőbeli elkerülése érdekében cellánként olvadóbiztosítókkal látnám el a rendszert.

Továbbá a nagyobb robusztusság miatt a tesztpaneles áramkört nyomtatott áramkörként gyártanám le. Ezek után a rendszer minimális módosításával különböző kisebb eszközöknél tudnánk alkalmazni, például modell repülőgépekben.

Az autóipari alkalmazáshoz azonban az akkumulátorfelügyeleti rendszert úgy kellene továbbfejleszteni, hogy egyszerre több cellát is tudjon kezelni. Ez a jelenlegi koncepció újra gondolásával, módosításával, vagy a már elkészített eszköz sokszorosításával (több szintű hierarchikus vezérléssel) lenne megvalósítható.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megragadni az alkalmat arra, hogy köszönetemet és tiszteletemet fejezzem ki mindenkinek, aki a szakdolgozatom elkészítéséhez nagyban hozzájárult.

Szeretném megköszönni egyetemi konzulensemnek, Orosz Györgynek a rengeteg segítséget szakmai és adminisztrációs kérdésekben, valamint a szakdolgozatom szerkezeti felépítésében is sokat segített. Mindig gyorsan válaszolt az e-mailjeimre és javította a hibáimat.

Köszönettel tartozom céges konzulensemnek, Bérces Dánielnek, aki mindig nagyon segítőkész volt legyen szó bármilyen kérdésről. Sokszor rávilágított a rendszer gyenge pontjaira. Szakértelmével inspirált a munkám során.

A kisütőáramkör tesztelések során nagyon hasznosnak bizonyult a kölcsönbe kapott hűtőventillátor, amit szeretnék megköszönni Brosch Balázsnak.

A rendszer összeillesztésében és a mérések során együtt dolgoztunk Nagy Mártonnal. Nagyon jól éreztem magam a munka során. Ezúton szeretném megköszönni közös munkát és az építő jellegű meglátásokat.

Továbbá hatalmas köszönettel tartozom az AVL AUTÓKUT Mérnöki Kft.-nek, hogy szakdolgozat témát biztosították számomra és megkaptam megfelelő műszereket, alkatrészeket feladat végrehajtásához.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni az AVL AUTÓKUT Mérnöki Kft. minden munkatársának, hogy ebben a kellemes légkörben tölthettem el ezt a féléveimet.

Irodalomjegyzék

- [1] Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, and Kai Strunz, *Electric Vehicle Battery Technologies*, pp 15-56, 2013.
- [2] Michael Boxwell, *ELECTRIC CAR HISTORY*, <https://web.archive.org/web/20140105043545/http://www.owningelectricense.com/electric-car-history.html>, 2012. december
- [3] Zachary Shahan, *Electric Car Evolution*, <https://cleantechnica.com/2015/04/26/electric-car-history/>, 2015. április
- [4] Eric Schaal, *5 Best-Selling Electric Vehicles From a Booming July*, <http://www.cheatsheet.com/automobiles/5-best-selling-electric-vehicles-booming-july.html/?a=viewall>, 2016. augusztus
- [5] Christopher D. Rahn and Chao-Yang Wang, *BATTERY SYSTEMS ENGINEERING - Battery Management Systems*, pp. 191-229, *Electrochemistry*, pp. 11-22, 2013.
- [6] Isidor Bruchmann, *BATTERY University - BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries*, http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries, 2016. április
- [7] Raul Amoros, *howmuch.net - Tesla Model S Becomes The Best Selling Electric Car in U.S. in 2015*, <https://howmuch.net/articles/tesla-becomes-best-selling-electric-car-USA-2015-11>, 2016. január
- [8] Josie Garthwaite, *Leaving Baggage On the Dock, a Flagship Departs From California*, <http://wheels.blogs.nytimes.com/2012/06/23/tesla-motors-launches-model-s-in-california/?ref=automobiles>, 2012. június
- [9] PANASONIC NCR18650B Datasheet, <http://www.tme.eu/hu/Document/3e0170a1e089819f286f7066e69035b4/NCR18650B.pdf>
- [10] James Moran, *Texas Instruments - PowerPump™ Balancing*, <http://www.ti.com/lit/an/slva524b/slva524b.pdf>, 2009. július
- [11] Woodward, *Resource Guide, MotoHawk Development and Prototyping System*, 2011.
- [12] Dirk Abel, Alexander Bollig, *Rapid control prototyping - 1. Auflage*, 2006
- [13] AVL belső használatú dokumentáció, *Step by step -Description of use MotoTron*
- [14] AVL belső használatú dokumentáció, *ECU Function Development on MotoTron Platform*
- [15] Tim Regan, Jon Munson Greg Zimmer, Michael Stokowski, *Current Sense Circuit Collection*, <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an105fa.pdf>, 2015. december

- [16] Stumpf Péter, Válogatott fejezetek az elektrotechnikából - T2 Tantermi gyakorlat - 2. példa Buck konverter tervezése, 2016
- [17] Nagy Márton Tamás, *Development of a battery pack supervisor algorithm using Rapid Control Prototyping – Implementing battery management functions*, 2016
- [18] Vishay BCcomponents, *2381 640 90059/NTCLE301E4C90059 NTC Thermistor datasheet*, <http://www.mouser.com/ds/2/427/64090059-200964.pdf>, 2006. szeptember

Minden link ellenőrizve: 2016.12.09.

Ábra- és táblázatjegyzék

Ábrák

2-1. ábra: NiMH akkumulátor cella sematikus ábrája [5]	5
2-2. ábra: Li-ion akkumulátor sematikus ábrája [5]	6
2-3. ábra: Panasonic NCR18650B akkumulátorcella	9
2-4. ábra: Akkumulátorcellák elrendezése és elnevezésük	9
2-5. ábra: Li-ion akkumulátor tipikus töltési karakterisztikája [1]	10
3-1. ábra: Akkumulátorfelügyeleti rendszer felépítése	13
4-1. ábra: MotoTron állomás főbb részei [13].....	15
4-2. ábra: ECM-0565-128-0702-C motorvezérlő egység.....	16
5-1. ábra: BUCK konverter [16].....	17
5-2. ábra: BUCK konverter feszültség és áram időfüggvényei [16]	19
5-3. ábra: Töltőáramkör kapcsolási rajza.....	21
5-4. ábra: Passzív cella töltéskiegyenlítő áramkör [1].....	22
5-5. ábra: Kapacitív elven működő aktív kiegyenlítő áramkör [1].....	23
5-6. ábra: PowerPump aktív töltéskiegyenlítő áramkör [10].....	24
5-7. ábra: PowerPump töltéskiegyenlítő áramkör tekercsének árama az idő függvényében.....	25
5-8. ábra: Töltéskiegyenlítő áramkör kapcsolási rajza	27
5-9. ábra: PowerPump töltéskiegyenlítés szimulációja	28
5-10. ábra: Kisütőáramkör kapcsolási rajza	29
5-11. ábra: Feszültségmérő-áramkör	30
5-12. ábra: Árammérő-áramkör kapcsolási rajza	31
5-13. ábra: Termisztoros hőmérés kapcsolási rajza.....	32
5-14. ábra: Vishay 2381 640 90059 típusú, 2.2 k Ω ellenállású NTC termisztor ellenállás karakterisztikája a hőmérséklet függvényében 54 [18]	32
5-15. ábra: Akkumulátorfelügyelti rendszer hardverének teljesítményáramköre	34
5-16. ábra: Akkumulátorfelügyelti rendszer hardverének mérőáramköre	34
6-1. ábra: A MotoTron-nal megvalósított MATLAB/Simulink modell legfelső szintje	37
6-2. ábra: A megvalósított szoftver felépítése a második szinten	37

6-3. ábra: Alsó két akkumulátorcella feszültségének beolvasása.....	38
6-4. ábra: Részlet az Outputs subsystem-ből, töltőáramkörhöz PWM és diszkrét kimeneti blokkok	40
6-5. ábra: Panasonic NCR18650B kisütési karakterisztikája, cellafeszültség a kisütési kapacitás függvényében [9]	41
6-6. ábra: BMS subsystem felépítése	42
6-7. ábra: Balance subsystem, töltéskiegyenlítő szoftver modellje	43
6-8. ábra: Töltőáramkör vezérlését megvalósító kaszkádszabályzó.....	44
7-1. ábra: Akkumulátorfelügyeleti rendszer tesztelése, mérési elrendezés [17]	45
7-2. ábra: 5 perces akkumulátor kisütés teszt grafikonjai	47
7-3. ábra: Hőmérséklet elleni szoftveres védelem tesztelés	48
7-4. ábra: Töltéskiegyenlítő áramkör tesztelése, akkumulátorcellák feszültsége az idő függvényében.....	49
7-5. ábra: PowerPump töltéskiegyenlítés teszt közben a sőtellenálláson eső feszültség	50

Táblázatok

2-1. táblázat: Akkumulátor típusok néhány elektromos autónál [1]	4
2-2. táblázat: Ni-MH és Li-ion akkumulátorok összehasonlítása [6].....	8
5-1. táblázat: 200 μ H körüli induktivitással rendelkező tekercsek.....	20