



Kolozsvári Műszaki
Egyetem



Akkumulátor felügyeleti rendszer interfész fejlesztése sb-RIO 9636 rendszerhez

Szerző: Kertész Norbert

Elektronika M.Sc.

Kolozsvári Műszaki Egyetem

Konzulens: Dr. Szabó Lóránd

egyetemi tanár

2023

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	4
2	Az akkumulátor felügyeleti rendszerek elméleti alapjai	6
2.1	Az akkumulátorok telepek felépítése és tulajdonságai	6
2.1.1	A Lítium-Ion akkumulátor	7
2.1.2	A Nikkel-fémhidrid akkumulátor	8
2.1.3	Az akkumulátorok töltési mechanizmusa	8
2.1.4	Az ólomsavas akkumulátor	9
2.2	Az akkumulátor felügyeleti rendszerek	10
2.2.1	A moduláris akkumulátor felügyeleti rendszerek felépítése	13
2.3	State of Charge és State of Health számítási algoritmus	14
2.3.1	Amper/óra alapján történő megközelítés	14
2.3.2	Töltési szint meghatározása a feszültség mérés segítségével	14
2.3.3	Számítási képletek	15
2.3.4	A töltési szint számításának vezérlése	15
3	Megvalósítás	17
3.1	Az áramkört felépítő alkatrészek	17
3.1.1	Az INA148QDRQ1 műveleti erősítő	17
3.1.2	Az AD7402-8BRIZ galvanikusan izolált analóg-digitális konverter	19
3.1.3	Az alkatrészlista	19
3.2	A kapcsolási rajz	20
3.3	A nyomtatott áramkör	23
3.4	Összeszerelés	24
3.5	Az adatfeldolgozó LabVIEW szoftver	25
3.6	LabVIEW FPGA kód	25
3.7	Az sb-RIO rendszeren futó LabVIEW kód	28
3.7.1	A hálózati változók beállítása alapértékre	29
3.7.2	A bit fájl beolvasása és a tranzisztorok alapértékre való beállítása	29

3.7.3	A mérési adatok feldolgozása	30
3.7.4	A terhelési áram ki, illetve bekapcsolása	31
3.7.5	Az akkumulátor cellák kiegyenlítése	32
3.7.6	A terhelés automatikus lekapcsolása	33
3.8	A Személyi számítógépen futó LabVIEW kód	33
3.9	A rendszer tesztelése	34
3.10	A hat akkumulátor felügyeletére alkalmazható interfész áramkör	37
4	Gyakorlati alkalmazhatóság	40
4.1	Cella szintű akkumulátor felügyeleti rendszer	40
4.2	Cella szintű akkumulátor felügyeleti rendszer megvalósítása	42
4.3	Fejlesztési tervek	44
5	Következtetések	45
6	Hivatkozások	46

1 Bevezetés

Napjainkban az autó- és energiaipar jelentős átalakuláson megy keresztül, melynek következtében a minőségi akkumulátorok fejlesztése megkerülhetetlen technológiai ágazatot jelent. Ezen eszközök kémiai tulajdonságaik következtében érzékenyek a töltése és merítése. Ennek következtében létfontosságú szerepe van az akkumulátor működését felügyelő rendszereknek (*Battery Management Systems, BMS*), melyek fő feladata, hogy folyamatosan méréseket végezzenek az akkumulátor telepen (áram I , feszültség U , hőmérséklet $^{\circ}\text{C}$). Az így nyert adatok segítségével a rendszer biztosítja, hogy az akkumulátor, a gyártó által megadott paramétereknek megfelelő működését, továbbá a rendszer ezen adatok segítségével határozza meg az akkumulátor töltöttségi szintjét (*State of Charge, SOC*), illetve felméri, hogy mennyit veszített a kapacitásából az idő múlásával (*State of Health, SOH*) [1].

Jelenleg a legelterjedtebb akkumulátor technológiák a nagyobb mennyiségű energia (több mint 20 kWh) eltárolása esetén a Li-Ion és a NiMH (Nikkel-metál-hidrid). Mindkét technológiának a sajátos kémiai tulajdonságainak köszönhetően számos előnye és hátránya van. Ugyanakkor, ezen technológia alkalmazása esetén elkerülhetetlen, az akkumulátor felügyeleti rendszerek alkalmazása (*BMS*), ugyanis ha nem megfelelő töltés és merítés, illetve kiegyensúlyozás irányítása és a hozzá szükséges adatok mérése, az akkumulátor élettartalma rohamosan lecsökken, szélsőséges esetekben kigyulladás, robbanás is vezethet. Az emberi életek védelmének érdekében fontos, hogy minden nagyobb kapacitású akkumulátor telep műszaki paramétereinek megfelelően felügyelve legyen egy BMS rendszer által.

A dolgozat fő célja, egy autóiiparban használható BMS rendszer megtervezése, megépítése és tesztelése a modell megtervezése, megépítése és letesztelése. A rendszer egy méréseket végző modulból, valamint a mérési adatokat feldolgozó sb-RIO vezérlő egységből áll. Ezen modul alkalmas arra, hogy a hozzá kapcsolt cellákra eső feszültségeket, a rajtuk áthaladó áramot, illetve a telep hőmérsékletét lemérje. Ezeket az adatokat a modul továbbítja egy központi egységnek, mely jelen esetben egy *National Instruments* által fejlesztett sb-RIO rendszer. A központi feldolgozó egység és a méréseket végző modulok galvanikusan le vannak választva egymástól, ezáltal a gyenge áramú adatfeldolgozó egység védve van egy esetleges hiba esetén, az akkumulátor felől érkező nagyáramoktól és feszültségektől. A központi vezérlőegység szerepét betöltő sb-RIO rendszer a beérkező adatok alapján egy LabVIEW programnyelvben létrehozott algoritmus segítségével, folyamatosan számítja az SOC értékét, túlmelegedés esetén pedig lekapcsolja az akkumulátort a rendszerről.

A dolgozat első részében bemutatásra kerülnek a különböző akkumulátor típusok, a BMS rendszerek elméletei alapjai a rendszer általános felépítésétől kezdve, a különböző konfigurációjú moduláris megoldásokig. Ezt követően kerül sor a SOC-t és a SOH-t meghatározó algoritmusok bemutatására. Az elméleti fejezet végén hőmérséklet mérés fontossága a biztonságos működés érdekében és a hőmérséklet értéke, mint az SOC és az SOH értékének számítását befolyásoló tényező leírása következik.

A második fejezetben a gyakorlati megvalósítás lépései kerülnek bemutatásra. Az alkalmazásnak megfelelő alkatrészek kiválasztásától kezdődően. Ezt követi a modul kapcsolási rajza, mely alapján megterveztem, a nyomtatott áramkör (*Printed Circuit Board, PCB*). A nyomtatott áramkört egy erre szakosodott prototípus (JLCPCB) gyártó cég készítette és szerelte össze.

A harmadik fejezetben a LabVIEW programkörnyezetben fejlesztett algoritmusok implementálásának a lépései következnek. Ezen algoritmusok az sb-RIO rendszeren futnak, a BMS rendszer működési intervalluma alatt folyamatosan számolják az SOC és az SOH értékét.

Az utolsó fejezetben bemutatásra kerülnek a rendszer tesztelésének eredményei, a dolgozatban bemutatott megoldás előnyei valamint hátrányai, melyek alapján a továbbfejlesztési tervek fogalmazódtak meg.

2 Az akkumulátor felügyeleti rendszerek elméleti alapjai

Ebben a fejezetben, részletesen ismertetésre kerül az akkumulátorok és az őket felügyelő rendszerek tulajdonságai, működési alapelvei.

2.1 Az akkumulátorok telepek felépítése és tulajdonságai

Az akkumulátorokat alkotó cellák gyártására több anyagtechnológia létezik, melyek közül jelenleg a leggyakrabban a Lítium-Ion (Li-Ion) és Nikkel-Fém-Hidrid (NiMH) alapú akkumulátorokat használják. Ezek a cellák a bennük lejátszódó kémiai folyamatok következtében elektromos áramot állítanak elő. Két fő részből állnak, egy pozitív és egy negatív elektródból, melyek közre zárják az elektrolitot, mely szigetelő anyagként funkcionál a két elektróda között. Amikor töltés alatt van az akkumulátor, a cellában lejátszódó kémiai reakció folyamán a pozitív elektród tölti be az anód szerepét, a negatív elektród pedig a katód szerepét. Lemerítés esetén, a belső kémiai reakció iránya megfordul, a pozitív elektród lesz a katód, míg a negatív elektród az anód.

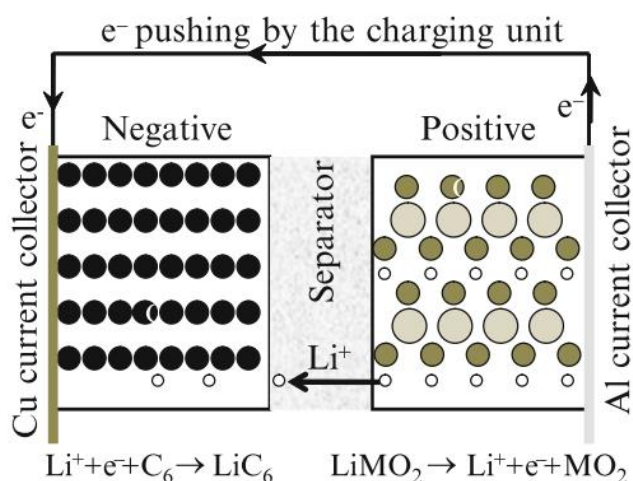
Alapfogalmak [2]:

- a) Cella: Az akkumulátor alapvető elektrokémiai áramtermelő egysége. A pozitív, negatív elektródok, valamint az elektrolit alkotja.
- b) Modul: több cellából áll, melyek sorosan vagy párhuzamosan vannak összekötve.
- c) Csomag/Telep(Pack): több modulból áll, melyek sorosan vagy párhuzamosan vannak összekötve.
- d) Amperóra (Ah) kapacitás: Az akkumulátor elektromos tároló kapacitásának a mértékegysége, az áramerősség (A) és az órában megadott kisütési idő szorzata.
- e) Töltöttségi arány (*nominal C-rate*): az energia mennyiség, melyet az akkumulátor képes leadni egy óra alatt.
- f) Specifikus energia (*Specific energy*): az akkumulátorban tárolt energia mennyiségének és az akkumulátor súlyának a hányadosa. Mértékegysége: Wh/kg.
- g) Energia sűrűség: az akkumulátorban tárolt energia mennyiségének és a térfogatának a hányadosa, mértékegysége: Wh/l.
- h) Belső ellenállás: az akkumulátor elektromos ellenállása, mértékegysége: Ω .

- i) Végfeszültség (*Cut-Off Voltage*): A gyártó által meghatározott minimális feszültség, mely értékig az akkumulátor használható.
- j) Töltöttségi szint (*State of charge, SOC*): Az akkumulátor által tárolt energia mennyisége, a maximális töltési szinthez viszonyítva, %-ban kifejezve.
- k) Lemerültség szintje (*Depth of Discharge*): Az elhasznált energia mennyiségét mutatja %-ban.
- l) Egészségiállapot (*State of Health, SOH*): az akkumulátor kapacitás vesztesét mutatja az idő múlásával %-ban kifejezve.
- m) Életciklus (*Cycle Life*): a töltési-merítési ciklusok számát mutatja.
- n) Akkumulátor felügyeleti rendszer (*Battery Management System, BMS*): egy elektronikus rendszer, mely adatok gyűjt és dolgoz fel az akkumulátor telepről.
- o) Hőmérséklet felügyeleti rendszer (*Thermal Management System*): az akkumulátor telepet védi a túlmelegedéstől és annak következményeitől.

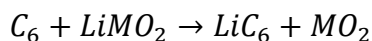
2.1.1 A Lítium-Ion akkumulátor

A lítium-ion akkumulátor egyike a legelterjedtebb energiatároló egységeknek. A negatív elektród szerepét egy szénelalapú anyag tölti be, pl. grafit. Töltés folyamán a Li-ban található ionok, a negatív ion szerepét betöltő grafithez vándorolnak, merítés, kisütés esetén pedig a fémalapú pozitív elektródákhoz vándorolnak (2.1 ábra) [2].



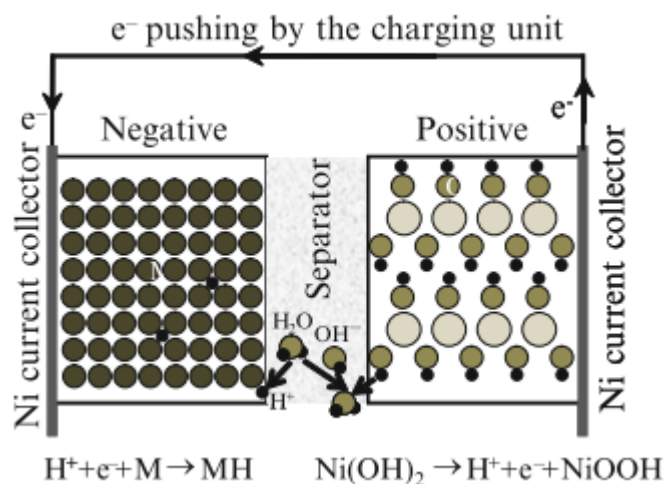
2-1 ábra. A lítium-ion akkumulátor felépítése [2]

Az akkumulátorban lejátszódó reakció a következő képlettek írható le [2]:



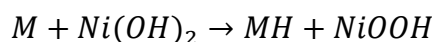
2.1.2 A Nikkel-fémhidrid akkumulátor

A Nikkel-fémhidrid (NiMH) akkumulátor esetén a negatív elektród szerepét egy hidrogén megkötő fémötvözet tölti be. A pozitív elektród a Ni(OH)_2 . A töltés ideje alatt, a fémötvözet megkötí a savas elektrolit által képzett hidrogént, míg a kisütéskor leadja a benne tárolt hidrogént [2]. Működését a 2.2 ábra szemlélteti.



2-2 ábra. A NiMH akkumulátor működése [2]

Az akkumulátorban lejátszódó reakció a következő képlettel írható le [2]:



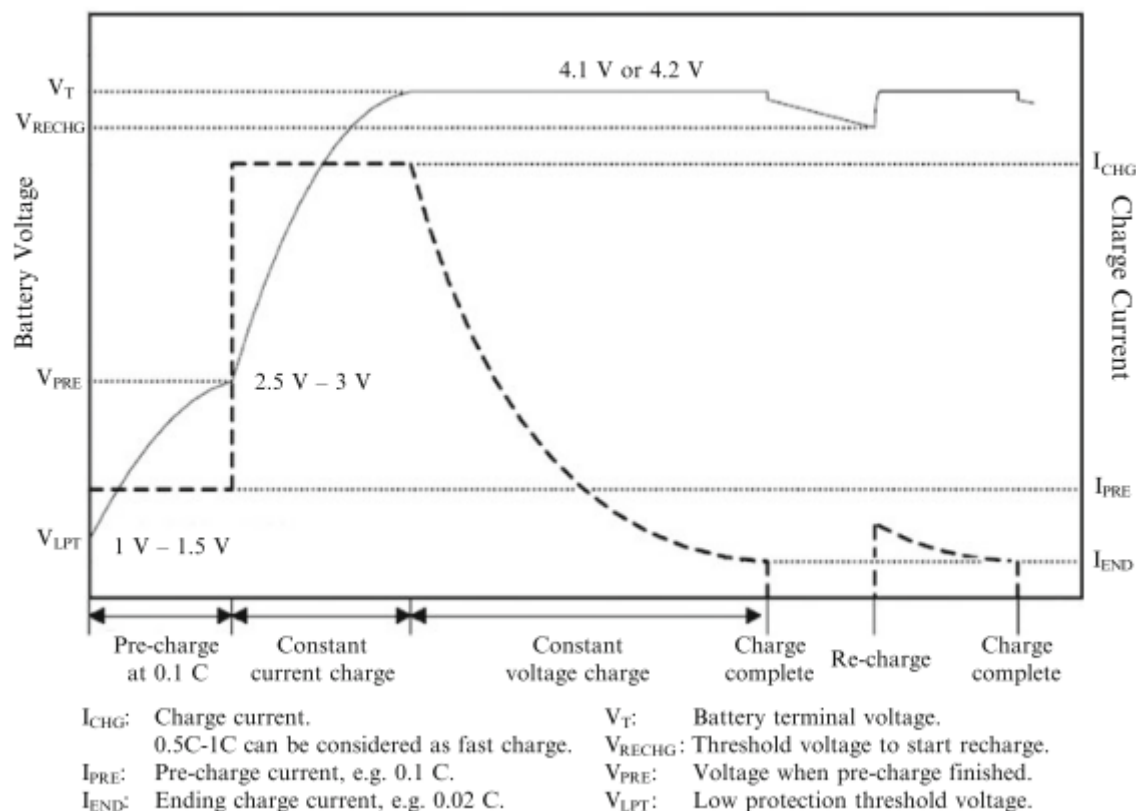
2.1.3 Az akkumulátorok töltési mechanizmusa

Az akkumulátorokat három lehetséges módon lehet tölteni: elsősorban állandó, konstans feszültségű töltéssel, vagy állandó, konstans erősségű árammal, valamint a két módszer ötvöztetésével.

A konstans feszültségű töltés folyamán egy állandó feszültséget kötnek az akkumulátorra. Ezt az eljárást bármilyen akkumulátornál alkalmazni lehet, egyike a legegyszerűbb töltési módoknak. A töltési áram erőssége a töltés ideje alatt folyamatosan változik, a töltési eljárás elején relatív nagy és folyamatosan csökken a zero értékig. Miután elérte ezt a zero értéket, a töltés megáll. Az eljárás hátránya, hogy a nagy áramerősség következtében, nagy teljesítményt igényel a töltés kezdeti időszakában [2].

Konstans áramerősségű töltés folyamán, a töltési feszültséget, a töltési áram irányítja. A töltés ideje alatt, az akkumulátor SOC szintje, az idő függvényében lineárisan nő. Az eljárás hátránya, hogy meg kell határozni, a töltési idő befejezését, melyre különböző algoritmusok léteznek [2].

A két töltési módszer, összekapcsolásával, a töltési eljárás a következő módon alakul: egy előtöltéssel (pre-charge) kezdődik, mely egy alacsony értékű konstans áramú töltés, ezt követően, a töltés egy nagyobb állandó, konstans áramú módba kapcsol (constant current charge), melyet egy-egy konstans feszültségű töltési mód fejez be (constant voltage charge) (2.3 ábra)[2].



2-3 ábra. Az kombinált töltési eljárás egy Li-Ion akkumulátor esetében [2]

I_{CHG} : töltési áram

I_{PRE} : előtöltési áram

I_{END} : töltési áram leállítása

V_T :akkumulátor telep feszültsége

V_{RECHG} : újratöltést jelző feszültség érték

V_{PRE} : feszültség értéke az előtöltési ciklus végén

V_{LPT} : alul merítési feszültség határértéke

2.1.4 Az ólomsavas akkumulátor

Az ólomsavas akkumulátort, elsősorban a hagyományos belső égésű motorral hajtott autókban alkalmazzák, előnyei közé tartozik, a viszonylag alacsony ára, továbbá kémiai

tulajdonságainak köszönhetően nem igényelnek felügyelő áramköröket. Viszont alacsony áruk következtében, a mérési modul első teszteléseire (feszültség-, árammérés) ezen akkumulátor fajta lesz felhasználva.

Felépítése egyszerű, két elektrolitba merített nagy felületű ólomlapból és a tároló edényből áll. A felület növelése érdekében egy ólomlap helyett gyakran alkalmaznak sűrű rácsot vagy több vékonyabb lapot, ezáltal sokkal nagyobb érintkezési felület jön létre az ólom és az elektrolit között. Az elektrolit általában kénsav (H_2SO_4) amely maró kémhatása miatt elővigyázatosságot igényel. Mivel a tiszta ólom (Pb) egy rendkívül puha fém ezért minden esetben valamilyen ötvöző anyag segítségével teszik ellenállóbbá a fizikai behatásokkal szemben. Ilyen ötvöző lehet az antimon (Sb), a kalcium (Ca), az ón (Sn) és a szelén (Se). A hozzáadott fémek nem csak a fizikai tulajdonságában jelentenek előnyt, hanem egyéb kémiai és elektromos jellemzői is javulnak, például csökken az önkisülés, jobban bírja a mélykisütést, vagy a ciklikus használatot [3].

2.2 Az akkumulátor felügyeleti rendszerek

Az elektromos autók esetén, létfontosságú, az akkumulátorok megfelelő felügyelete, mely nélkül nem garantálható, a biztonságos működésük. Ennek következtében az akkumulátor felügyeleti rendszerek (*battery management systems, BMS*). Ennek következtében az BMS rendszerek elsődleges feladata, hogy ellenőrizzék és irányítsák a töltés illetve merítés folyamatát, melynek köszönhetően, az akkumulátor mindig a gyártó által megadott paraméterek szerint üzemel [2].

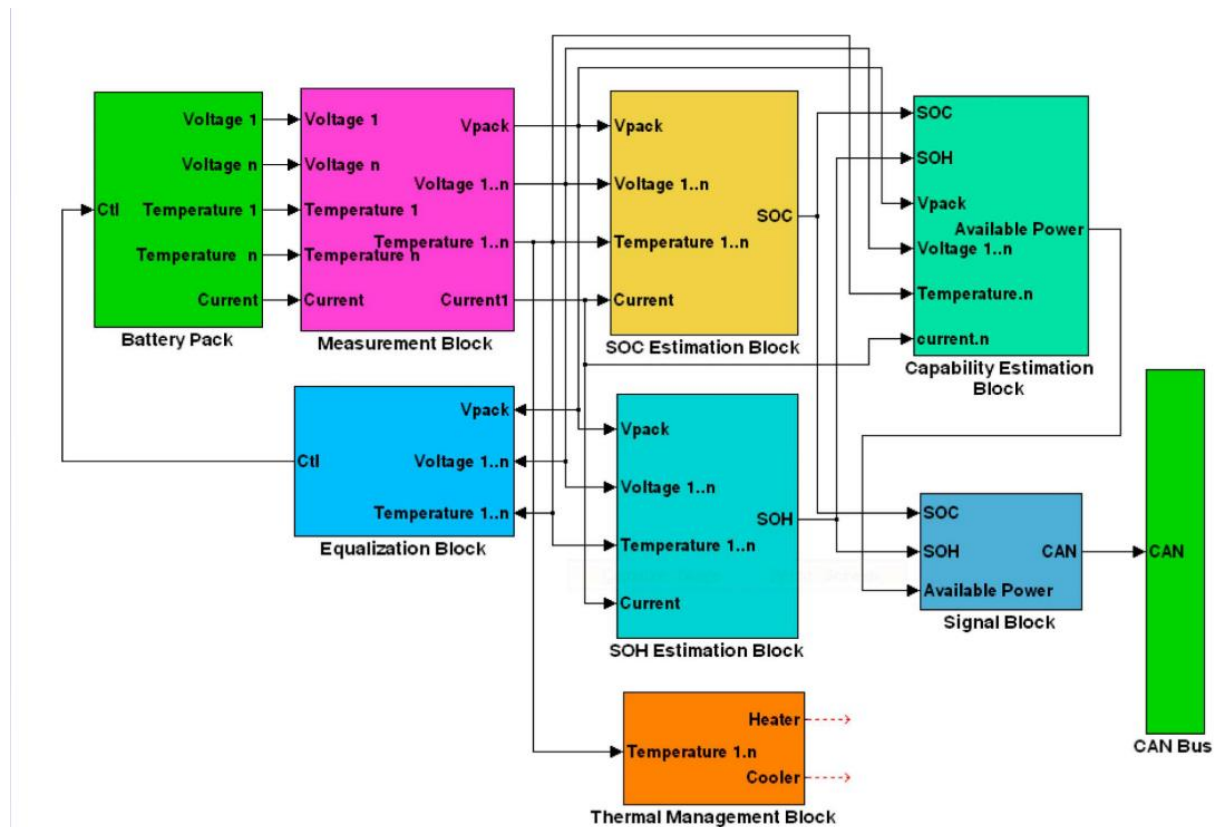
Az elektromos akkumulátorok a leggyakrabban alkalmazott energiatároló egységek. Az akkumulátorok által leadott energia mennyisége nagyban függ a bennük lejátszódó kémiai folyamatoktól. Az idő múlásának és a használatnak a következtében, az akkumulátorban található kémiai elemek idővel előregednek. Ennek a következtében az akkumulátor energia tároló képessége drasztikus mértékben lecsökken. Ennek tudatában létfontosságú, hogy mérsékeljük ezt a folyamatot a töltés és vezérlési ciklusok folyamatos felügyeletével, irányításával. Két féle akkumulátor felügyeleti rendszer létezik, az egyik megoldás olcsó és alkalmazás specifikus, a második drágább de jóval több flexibilitást nyújt [2].

A legfontosabb paraméter a biztonságos töltés és merítés érdekében az SOC. A töltöttségi állapot az akkumulátor aktuális töltöttségi szintjét mutatja százalékban a maximális töltöttségi szinthez viszonyítva. Ennek a paraméternek a segítségével ismeri a rendszer az akkumulátor aktuális állapotát és vezérli a töltést, merítést ennek a függvényében. Az SOC-t meghatározását rendszerint egy komplex algoritmus végzi a feszültség, áramerősség

hőmérséklet ismeretében [2]. Ezen algoritmus létfontosságú szerepet játszik a túltöltés, túlmerítés megakadályozásában. Az akkumulátor belsejében lejátszódó reakciók következtében, az akkumulátor belső hőmérséklete változik, mely befolyásolhatja az SOC meghatározását [2].

Az akkumulátor telepek számos cellából állnak össze. Ennek következtében a BMS rendszer számos mérést kell végezzen valamint külső paramétereket is figyelembe kell vegyen, a pontos kapacitás meghatározása érdekében, hogy az algoritmus valósághoz közeli értéket tudjon számolni (pl. ha az autó egy lejtős, emelkedős útszakaszon halad) [2].

A BMS rendszer a töltőtől teljesen független, viszont megkerülhetetlen szerepének következtében szorosan össze van integrálva vele. A felépítése két fő egységre osztható: a mérő áramkör, mely szenzorok segítségével elvégzi a szükséges méréseket, valamint egy központi egység mely elvégzi az adatok feldolgozását, meghatározza az SOC-, SOH-t, irányítja a cellák kiegyensúlyozását. Egy autóiiparban használt BMS blokk diagramja ábrán látható [1]. A rendszer a következő részekre bontható: akkumulátor telep, mérő áramkörök, kiegyenlítő áramkör, SOC számítás, SOH számítás, hőmérséklet szabályozó. A mért és számolt adatot a rendszer tovább küldi egy központi vezérlő egységhez, jelen esetben a Control Area Network (CAN) nevű protokollon keresztül [1]. A központi vezérlő egység általában egy mikrokontroller.



ábra 2-4. Az akkumulátor felügyeleti rendszer folyamatábrája [1]

A folyamatára a következő részekből áll:

1) Mérő egység (*Measurment block*)

A mérő egység feladata, hogy elvégezze az akkumulátortelepen az alkalmazáshoz szükséges méréseket, valamint a mért adatokat továbbítja azon egységnek, melyek ezen adatok segítségével meghatározzák az akkumulátor telep paramétereit (pl. SOC, SOH).

2) Algoritmus egység (*SOC, SOH block*)

Az akkumulátor SOC, illetve SOH állapotát jelképező adatok meghatározása, csak komplex algoritmusok segítségével lehetséges. Fontos, hogy az algoritmusok mindig figyelembe vegyék az akkumulátor telep aktuális hőmérsékleti értékét, feszültségét stb.

3) Alkalmasság meghatározása (*Capability block*)

Az akkumulátor telep biztonságos működése érdekében, létfontosságú, hogy az SOC, SOH meghatározása után a rendszer adatokat továbbítson a központi vezérlő egységnek az akkumulátor biztonsági szintjéről.

4) Kiegyenlítő egység (*Equalization block*)

A gyártási technológia következtében, eltérések vannak az akkumulátor telepet alkotó cellák tároló kapacitásában. A folyamatos feszültség mérésnek köszönhetően, a rendszer folyamatosan figyeli, ha valamelyik cella feszültsége eltér a megengedett eltérési küszöbtől és a legkevésbé feltöltött cellát tölti, a leginkább feltöltött cellát pedig meríti a rendszer.

5) Hőmérséklet felügyelő egység (*Temperature block*)

A hőmérséklet folyamatos felügyeletével, garantálva van, hogy az akkumulátor a paramétereinek megfelelő környezetben működjön. A hőmérséklet szabályozása elengedhetetlen az SOC, SOH pontos meghatározása érdekében.

6) Kommunikáció és adatfeldolgozás (pl. *CAN bus*)

Napjainkban az autóban számos elektronikai eszköz, rendszer található, melyeket egy központi vezérlőegység felügyel. Az autó megfelelő működése érdekében, elengedhetetlen, hogy ezek a rendszerek tudjanak egymással

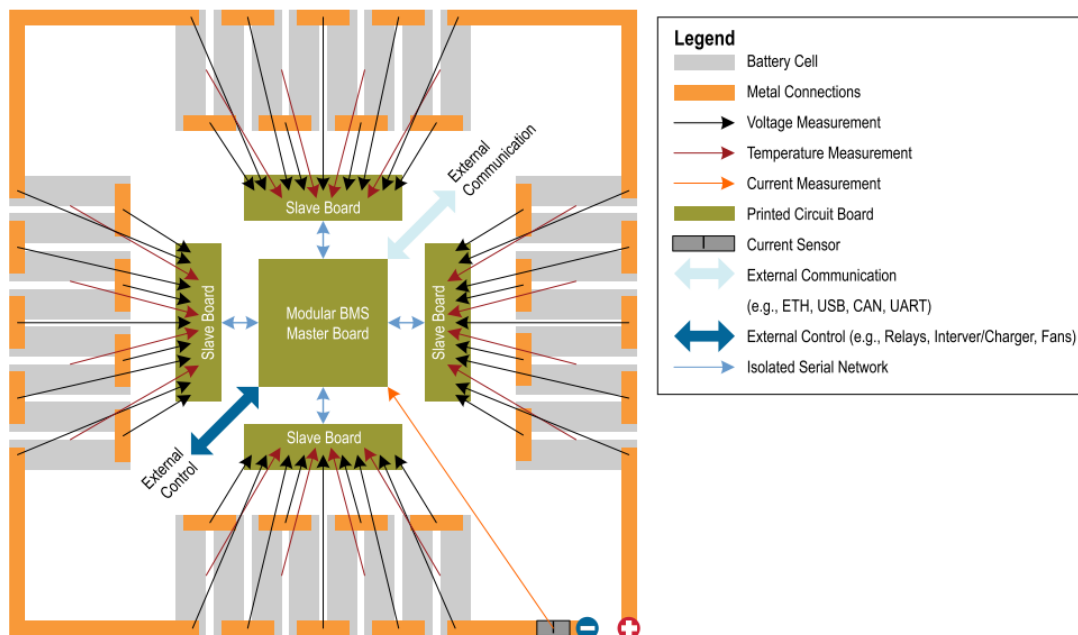
kommunikálni. Az autókban leggyakrabban alkalmazott kommunikációs protokoll a CAN (*Control Area Network*).

2.2.1 A moduláris akkumulátor felügyeleti rendszerek felépítése

A BMS rendszerek fejlődésének következtében a mikrokontrollerek nem képesek feldolgozni az egyre növekvő adatmennyiséget, ezért a jövőben egy lehetséges megoldást nyújtanak az FPGA alapú adatfeldolgozó rendszerek [4], [5].

A rendszer két fő részből fog állni a BMS modul(ok)ból valamint az ezeket vezérlő FPGA rendszerből. A kommunikáció a központi egység és a modulok között egy kommunikációs protokollon keresztül fog megvalósulni, mely a *master-slave* elv alapján működik. A rendszert a következő architektúrák segítségével lehet felépíteni [4]:

1. Központosított (*Centralized*): a rendszer egyetlen központi egységgel rendelkezik, mely feldolgozza a modulok által mért adatokat. Előnye, az alacsony ára, hátránya a kábelezés/nyomtatott áramkör bonyolultsága [4].
2. Szétosztott (*Distributed*): Az akkumulátor összes cellája rendelkezik egy BMS modullal. Ezek a modulok folyamatosan kommunikálnak egymással. A rendszer előnye a könnyű skálázhatóság [4].
3. Moduláris (*Modular*): egy köztes rendszer, melyben egyesülnek központosított és a szétosztott architektúrájú BMS rendszerek előnyei [4].



ábra 2-5. A BMS rendszer általános architektúrája [4]

A BMS rendszerek általános architektúrája a 2. ábrán látható. A mérő áramkörök (*slave board*) folyamatosan kommunikálnak a BMS központi egységével, ezeket az adatokat pedig a rendszer továbbítja [4].

2.3 State of Charge és State of Health számítási algoritmus

2.3.1 Amper/óra alapján történő megközelítés

Az Amper/óra alapján történő megközelítés (*Coulomb counting method, Ampere/hour method*), a leggyakrabban használt módszer, az akkumulátor töltési szintjének megbecsülésére. Ez az eljárás, az akkumulátoron áthaladó áramot méri, melyet matematikailag integrál a használati időtartam alatt [6], [7].

A következő összefüggés segítségével írható le [6], [7]:

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

$SOC(t_0)$ – a töltési állapot kezdeti értéke (*initial value of SOC*)

C_{rated} – az akkumulátor kapacitása (*rated capacity*)

I_b – az akkumulátor által kiadott áram

I_{loss} – a terhelésen elhasznált áram

Ez a módszer folyamatosan próbálja megbecsülni az akkumulátor töltési szintjét, azáltal, hogy folyamatosan méri az akkumulátorba ki, illetve bejövő töltés mennyiségét. Az akkumulátorban eltárolt kapacitási mennyiség mely szabadon elhasználható mindig kisebb, az eltárolt mennyiségnél, ugyanis, más szavakkal, a töltés és a merítés is veszteségekkel jár, amennyiben még ezekhez hozzáadódik az akkumulátor azon tulajdonsága, hogy idővel magától is veszít a kapacitásából (*self-discharge*), akkor az algoritmus pontatlan lehet. Ennek kivédésére ajánlott újra kalibrálni, beállítani bizonyos időintervallumonként az algoritmus adatait [6], [7].

2.3.2 Töltési szint meghatározása a feszültség mérés segítségével

Ez az eljárás az akkumulátor feszültségét átszámolja egy töltési szinthez, a merülési görbe (*discharge curve*) ismeretében. Viszont fontos kiemelni, hogy a feszültség változhat az akkumulátor hőmérsékletének függvényében. Ennek következtében, nehéz megtalálni azt a stabil pontot, melynél az a módszer pontos [6], [7].

2.3.3 Számítási képletek

Az SOC értéke a következő képlettel fejezhető ki [6]:

$$SOC = \frac{C_{releasable}}{C_{rated}} 100\%$$

$C_{releasable}$ – az akkumulátor felhasználható kapacitása

A folyamatos használat következtében figyelembe kell venni, hogy a C_{max} értéke változik a C_{rated} értékétől, ezért a célszerű elmenteni bizonyos időintervallumonként, vagy pedig feltöltések végén [6].

$$SOH = \frac{C_{max}}{C_{rated}} 100\%$$

Amikor egy akkumulátor merül, fontos adat a merítési tényező (depth of discharge), mely megmutatja, hogy hány százalékkal csökkent az akkumulátorban eltárolt energia [6].

$$DOD = \frac{C_{released}}{C_{rated}} 100\%$$

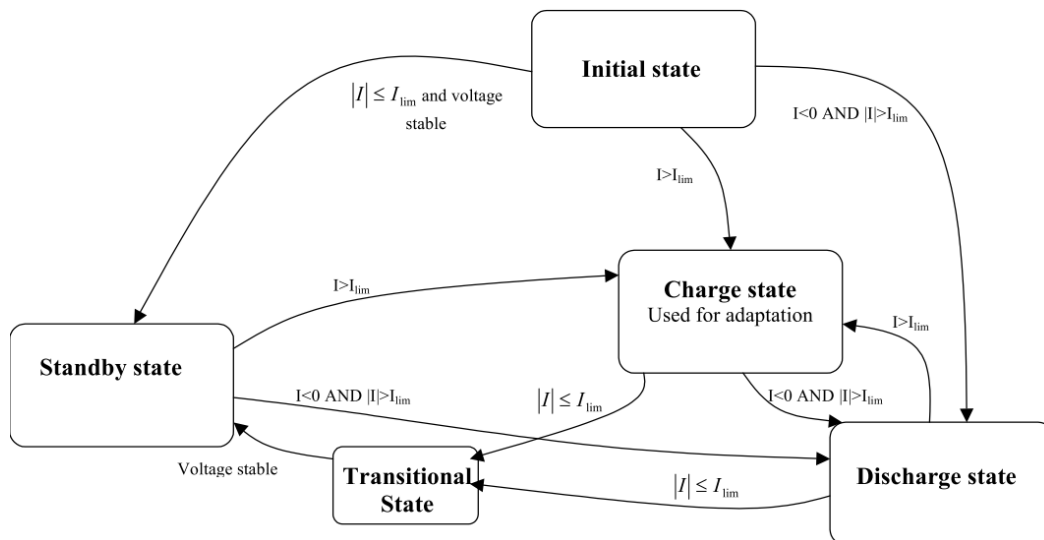
Az SOC számításánál érdemes fontos, hogy a folyamatosan csökkenő SOH értéke is figyelembe legyen véve. Ezért az SOC-t a következő képlettel lehet leírni [6]:

$$SOC(t) = SOH(t) - DOD(t)$$

2.3.4 A töltési szint számításának vezérlése

A töltési szint kiszámítása folyamán több lehetséges esetet is figyelembe kell venni, ezért egy állapotgép (*state-machine*) struktúrával kivitelezhető. Az állapotgép a következő állapotokkal rendelkezne: kezdeti, készenléti, átmeneti, töltési, merítési. Az állapotgép mindig az adott állapothoz, alkalmazáshoz igazítja az SOC számítást.

Az rendszerhez tervezett SOC-t számító állapotgép működését, valamint az állapotok között fennálló kapcsolatokat a 2.6. ábra mutatja be [8].



ábra 2-6. Az SOC algoritmus működése [8]

Az algoritmus az állapotgép (*state machine*) elve alapján működik, melyek a következő állapotokra (*state*) lehet felosztani:

1. Kezdeti állapot (*Initial state*): Ebben az állapotban az SOC megbecsülése feszültségmérés, illetve a hőmérséklet mérés alapján határozza meg egy algoritmus töltöttségi szintet [8].
2. Készenléti állapot (*Standby State*): ebben az esetben nagyon kevés áramot ad ki az akkumulátor. A töltöttségi szintet ugyancsak egy algoritmus határozza meg a feszültség az áram és a elektromotoros erő (*elektro-motive force*) segítségével [8].
3. Átmeneti állapot (*Transitional state*): a rendszer ebben az állapotban megvizsgálja, hogy az feszültsége stabil-e. Amennyiben igen Töltési/Merítési állapotról ezen az állapoton keresztül áll át a készenléti állapotba [8].
4. Töltési állapot (*Charge State*): Az áram értéke nagyobb mint a készenléti áram esetén. A rendszer töltöttségi szintet Coulomb számlálás (*Coulomb counting*) segítségével határozza meg [8].
5. Merítési állapot (*Discharge state*): Áram értéke negatív, a rendszer töltöttségi szintet Coulomb számlálás segítségével határozza meg [8].

3 Megvalósítás

A projekt megvalósítása a következő lépéseket foglalja magába:

1. Az alkalmazásnak megfelelő alkatrészek kiválogatása.
2. A kapcsolási rajz elkészítése EAGLE szoftver segítségével
3. A nyomtatott áramkör (PCB) megtervezése EAGLE szoftver segítségével
4. Az adatok beolvasását és feldolgozását végző program létrehozása LabVIEW környezetben (tervezett).
5. Az SOC és SOH kiszámítását végző szoftver létrehozása LabVIEW környezetben (tervezett).
6. A hardver és szoftver kombinációjának tesztelése (tervezett).

3.1 Az áramkört felépítő alkatrészek

Az áramkör alkatrészei a Mouser Electronics nevű cégtől voltak rendelve. A fő alkatrészek a következők:

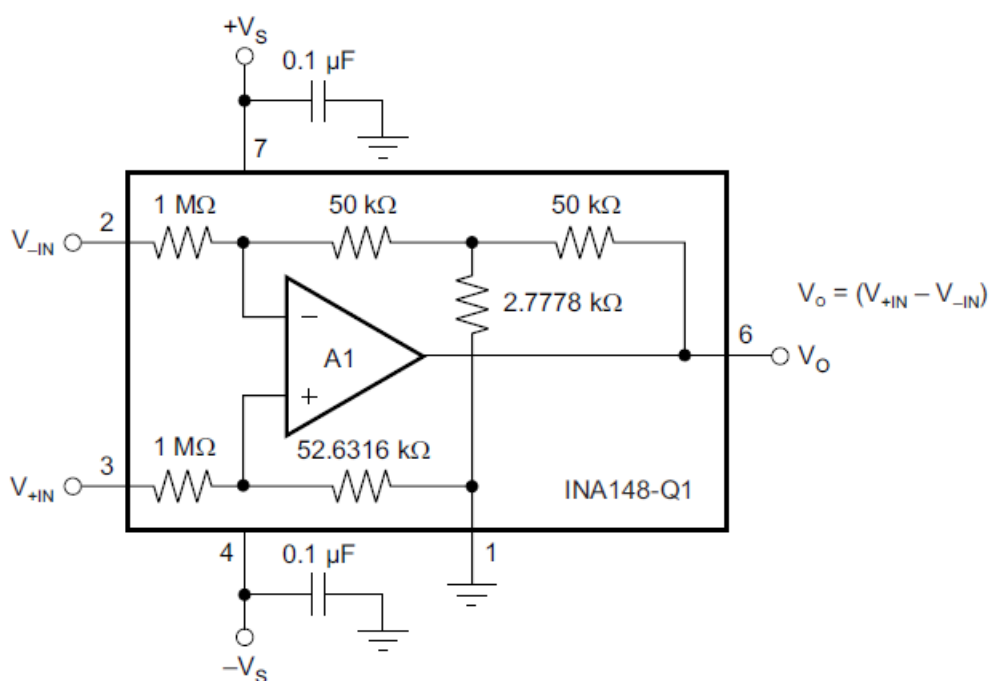
1. INA148QDRQ1: a Texas Instruments által fejlesztett műveleti erősítő, mely feszültség eltolást biztosít (*common-mode voltage difference amplifier*).
2. AD7403-8BRIZ: az Analog Devices által gyártott analóg-digitális konverter (ADC), mely képes galvanikus leválasztásra is.
3. IRLML2502TRPBF: az Infineon által gyártott MOSFET tranzisztor, mely a mérések és az akkumulátorok kiegyenlítésekor kapcsolóként szolgál.
4. SFH618A-3X006: egy optocsatoló, melynek segítségével az sb-RIO rendszer irányítja a tranzisztort, ugyanakkor az sb-RIO rendszer galvanikusan le van választva a mérő áramkörtől.

3.1.1 Az INA148QDRQ1 műveleti erősítő

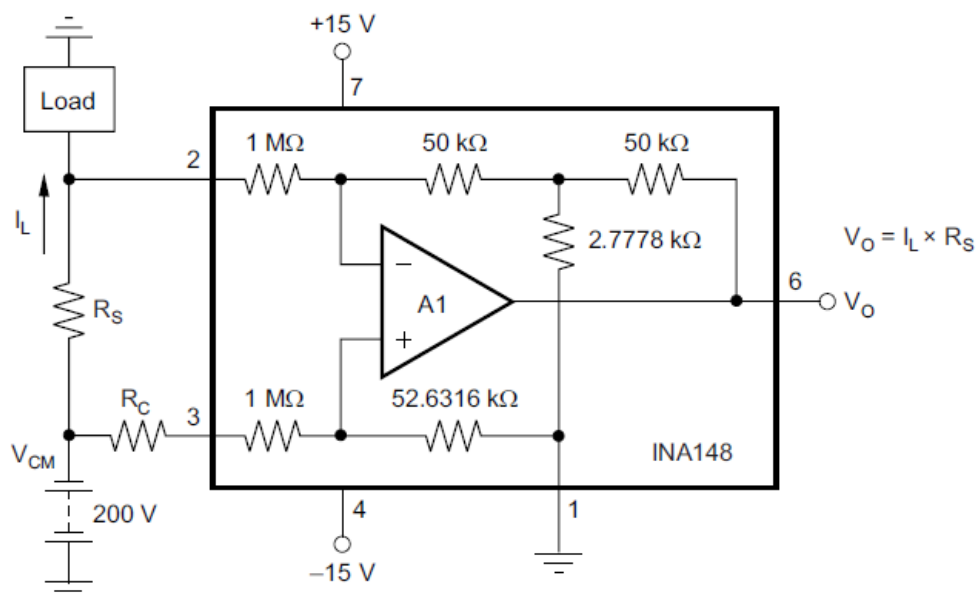
Ezt a műveleti erősítőt első sorban autókba tervezték, 5 V-os tápfeszültség esetén képes akár -100 V feszültségtől + 80 V feszültségig mérni [9]. Ennek következtében kiválóan megfelel a projekt követelményeinek, mely legtöbb 12 V feszültséget követel (maximum 2 db.Li-Ion cella vagy ólom-savas akkumulátor). A feszültség mérése, akár $\pm 200\text{V}$ -ig is terjedhet, amennyiben a tápfeszültsége 5 V helyett $\pm 15\text{ V}$.

A műveleti erősítő által kiadott jel a feszültsége, feszültségméréskor megegyezik a lábai között levő feszültség értékével (3.1 ábra). Áramméréskor a kiadott jel feszültsége

egyenlő Ohm törvénye alapján a mérő ellenállás értékének, valamint a rajta áthaladó áram értékének szorzatával (3.2 ábra) [9].



ábra 3-1. Feszültség mérése a műveleti erősítő segítségével

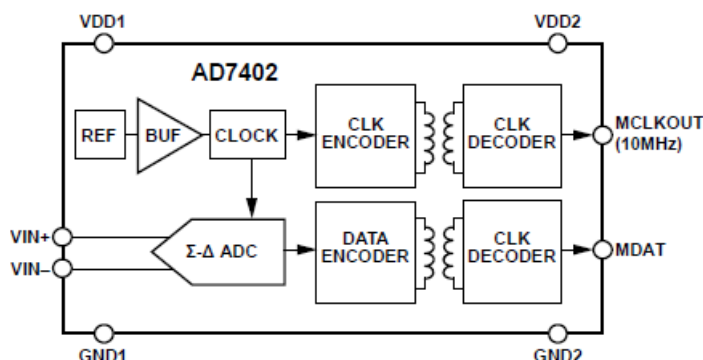


ábra 3-2. Az áram mérése a műveleti erősítő segítségével [9].

Ha a műveleti erősítő kimenetére $100\text{ k}\Omega$ értékű terhelés van kötve, akkor $\pm 0.25\text{ V}$ és $\pm 1\text{ V}$ közötti feszültséget ad ki [9].

3.1.2 Az AD7402-8BRIZ galvanikusan izolált analóg-digitális konverter

Az AD7402-8BRIZ-nek szüksége van mindkét oldalán egy 5 V-os feszültségforrásra. A bemeneti jele ± 250 mV között kell legyen [10]. Belső szerkezetét a 3.3 ábra szemlélteti.



ábra 3-3. Az AD7402 belső szerkezetét bemutató diagram [10]

Az MDAT és MCLKOUT kimeneti pin-ek adatait fogja beolvasni az sb-RIO rendszeren futó program.

3.1.3 Az alkatrészlista

Az alkatrészek a Mouser Electronics cégtől voltak megrendelve, az áramkörhöz összesen 24 féle alkatrész szükséges. A teljes lista a 3.1-es táblázatban található.

Tipus	Mfr Part Number (Input)	Gyártó	Leírás	Darabszám	Egységár
Kondenzátor	TMK212BBJ106MGHT	Tayo Yuden	C10u	10	0.51
ADC	AD7402-8BRIZ	Analog Devices	ADC	3	32.5
Kondenzátor	C0805C102K1HACTU	KEMET	C1n	10	0.19
Kondenzátor	C0805C221J1HACTU	KEMET	C220p	10	0.21
Kondenzátor	885012207098	Würth Elektronik	C0.1u	3	0.29
Kondenzátor	C1210V473KDRACU	KEMET	C0.047u	1	2.49
Műveleti erősítő	INA148QDRQ1	Texas Instruments	IC	3	25.27
Logikai kapuk	SN74LS06N	Texas Instruments	IC	1	3.97
Csatlakozó	STMM-125-02-L-D	SAMTEC	Conn50	1	33.03
Pinhead	68001-112HLF	Amphenol	PHd	2	2.97
Optocsatoló	SFH618A-3X006	Vishay	Optocoupler	4	4.63
MOSFET	IRLML2502TRPBF	Infineon	Tranistor	4	2.01
Ellenállás	WK73R2B15TTD100J	KOA Speer	R10, 1.5W	2	0.64
Ellenállás	CRCW0805330RFKEAC	Vishay	R330	4	0.44
Ellenállás	CRCW0805600RFKEAHP	Vishay	R600	4	1.27
Ellenállás	CRCW080510R0JNEAC	Vishay	R10	6	0.44

Folytatás a következő oldalon

Ellenállás	ERJ-6RBD7502V	Panasonic	R75k	2	0.61
Ellenállás	CRCW080510K0JNEAC	Vishay	R25k	2	0.43
Ellenállás	RT0805FRE076K04L	Yageo	R6k	1	0.52
Ellenállás	CRCW08052K00FKEAC	Vishay	R2k	1	0.43
Ellenállás	RL0805JR-070R25L	Yageo	R0.25	1	1.75
Csatlakozó	5430373	Phoenix Contact	Conn3p	3	7.08
Csatlakozó	5430360	Phoenix Contact	Conn2p	1	4.54
Kábel	TCS-D-25-D-03.00-01-N	SAMTEC	Cable	1	65.94
				Összesen (RON)	362.53

táblázat 3.1 Az alkatrészek listája.

3.2 A kapcsolási rajz

A tervezett modul két akkumulátor mérésére valamint kiegyenlítésére alkalmas (ábra 3.4). Az akkumulátorok feszültség mérésére az áram az X1 csatlakozón keresztül jut el és a két műveleti erősítőbe (INA148-Q1, IC1, IC2). A műveleti erősítő kiadja a bemenetei között található feszültség értékét, ezzel megvalósítja a feszültség eltolást. Mivel az analóg digitális konverter a bemeneteire érkező jel maximum ± 0.25 V lehet, ezért egy feszültségosztóval a bemeneti jel maximális feszültsége, erre az értékre redukálódik. Az analóg-digitális konverterből az átalakított jelek tovább mennek az sb-RIO rendszer felé és feldolgozás alá fognak kerülni a LabVIEW szoftver által.

A tranzisztorok (Q1, Q2, Q3, Q4) vezérlése az sb-RIO rendszer digitális kimenetei segítségével valósul meg. Amikor a kimeneti jel alacsonyan van, a negáló/tagadó logikai kapukból (SN74LS06NG4, IC4), magas kimeneti jel továbbítódik az optocsatolóhoz. Ennek következtében az optocsatolóban (OK1, OK2, OK3, OK4) található tranzisztor kinyit és a rajta áthaladó áram elegendő feszültséget fog biztosítani a MOSFET (Q1, Q2, Q3, Q4) Gate terminálján, melynek következtében a tranzisztor kinyit. A Q1, Q2 tranzisztorok az akkumulátor cellák feszültségének kiegyenlítését teszik lehetővé.

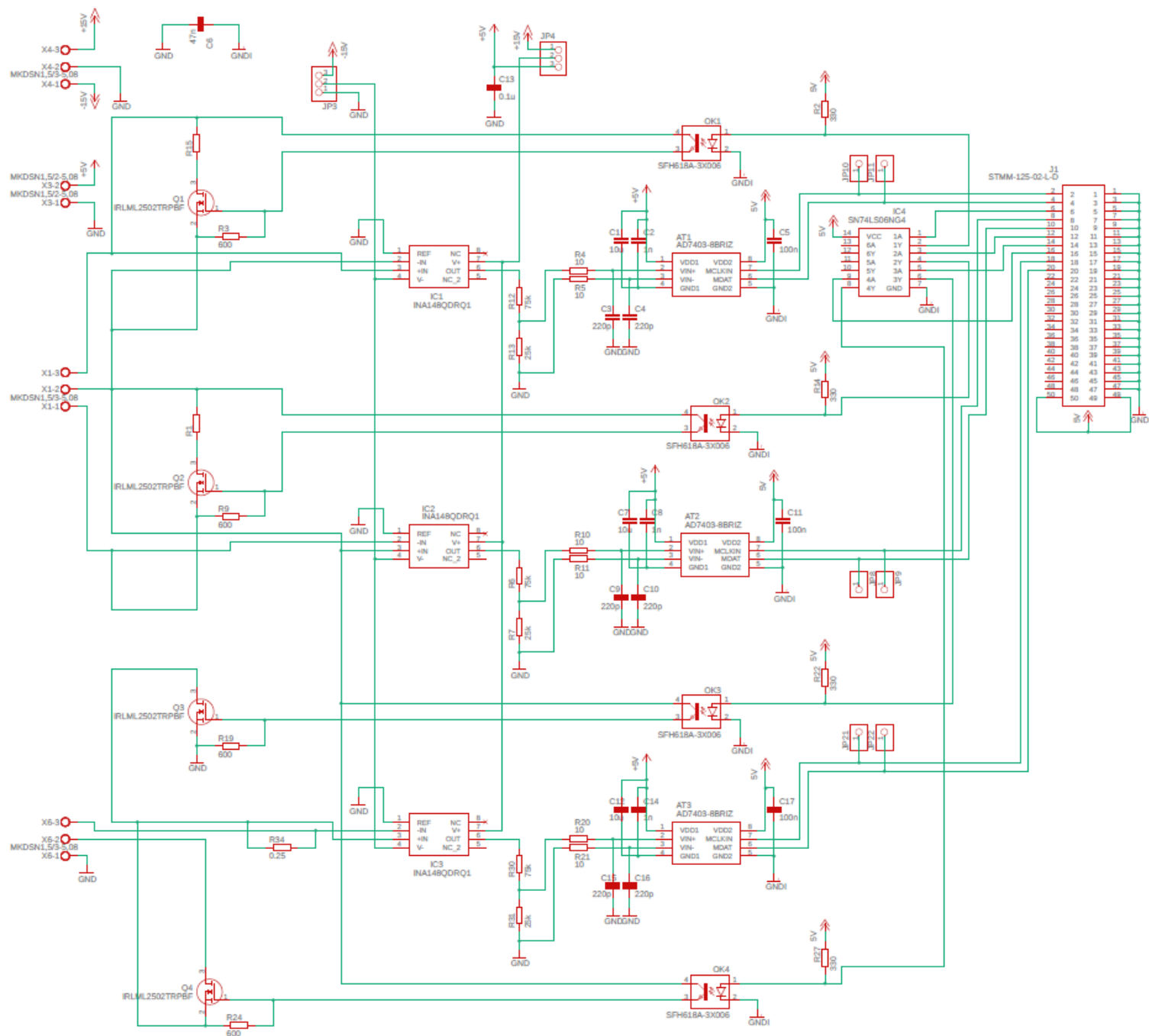
A Q3 tranzisztor vezérli az akkumulátorok töltését (ábra 3.5). A Q4 pedig egy akkumulátorokra kötött terhelésként funkcionáló motort képes irányítani (ábra 3.6).

Az áramkörön áthaladó áram mérése az R34 ellenálláson valósul meg. Az ellenálláson mérő feszültséget szintén egy műveleti erősítő (INA148-Q1, IC3) méri le és továbbítja az sb-RIO fele, szintén egy analóg-digitális konverter segítségével.

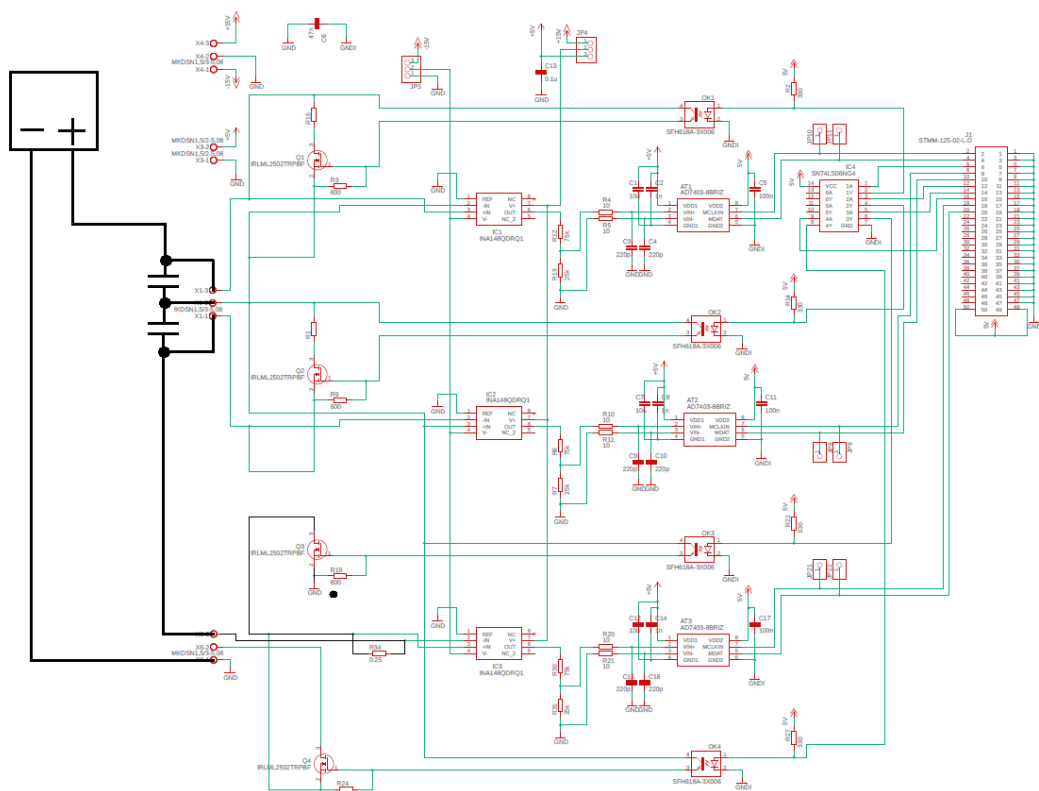
Az INA148-Q1 tápegysége lehet 5 V vagy ± 15 V. Jumper-ek segítségével lehet kiválasztani a kívánt konfigurációt (JP3, JP4). Az áramkör többi eleme 5 V-os tápfeszültséget

igényel. Az optocsatoló, illetve az ADC jobb oldalán a tápegységet az sb-RIO 5 V-os kimenete biztosítja.

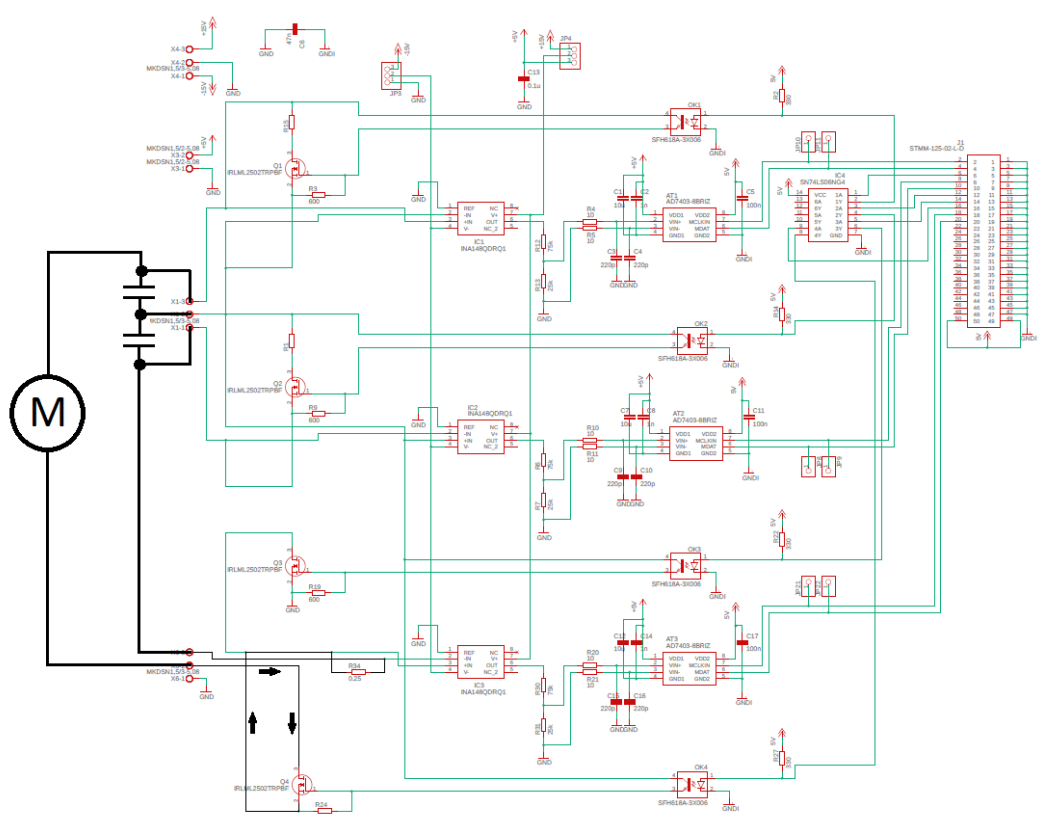
Feszültség kiegyensúlyozás passzív eljárással történik, a energia a Q1, Q2 tranzisztorok segítségével levezetődik az R1 és R15 ellenálláson.



ábra 3-4. A modul kapcsolási rajza



ábra 3-5. Az áram útvonala töltéskor



ábra 3-6. Az áram útvonala terhelés esetén.

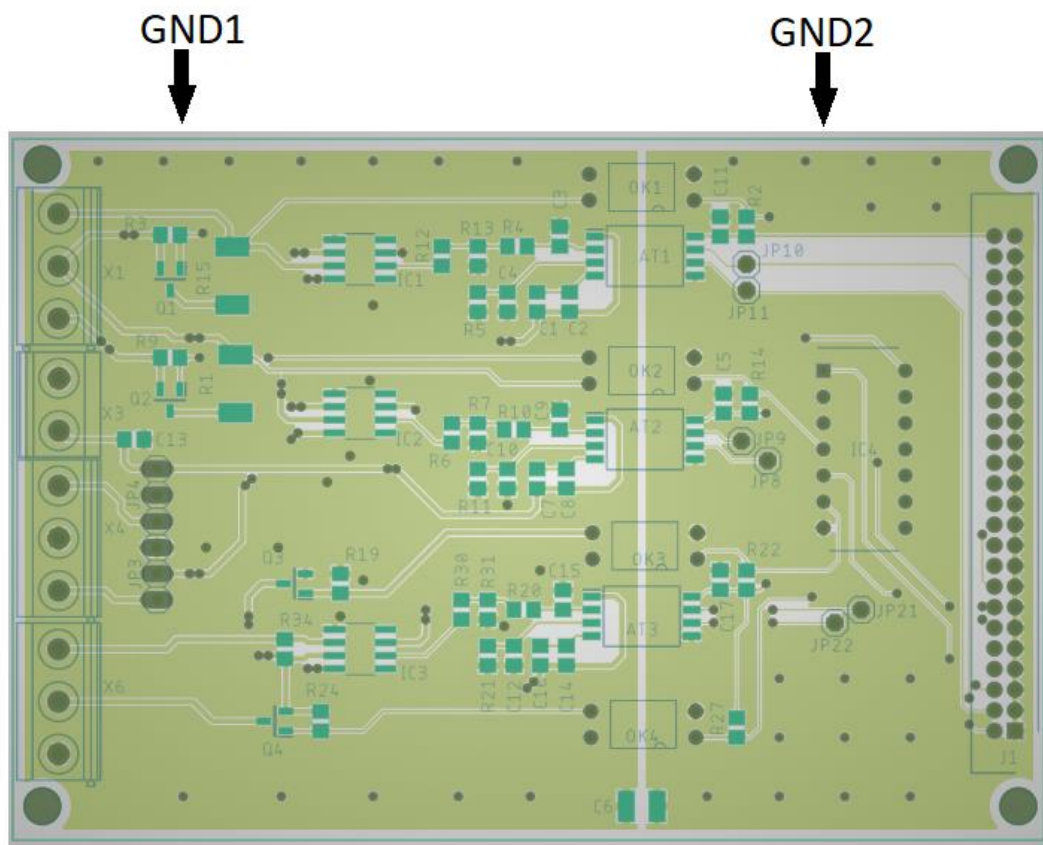
3.3 A nyomtatott áramkör

A nyomtatott áramkör tervei EAGLE szoftver segítségével készültek el. A nagyobb áramú részek vastagabb (25 mils) huzalokkal (trace) voltak tervezve, illetve ezeken a részeken két darab via segíti a PCB rétegei között az átmenetet. Ennek köszönhetően ezek a részek alkalmasak arra, hogy nagyobb értékű áramot is elbírijanak (maximum 5 A).

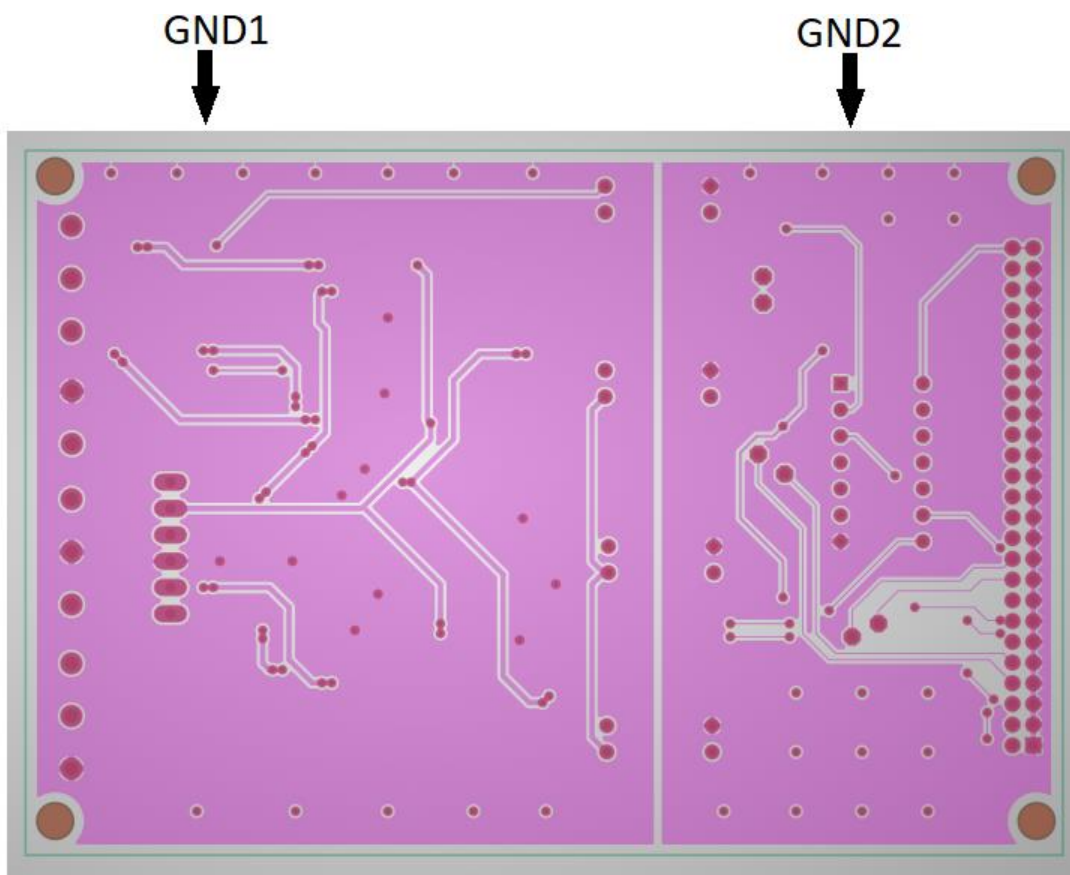
A galvanikus leválasztás érdekében, két darab, egymástól elválasztott földelés (ground plane, GND1, GND2) található a PCB-n. Ezek egy kondenzátorral vannak összeköve (C6), melynek szerepe, hogy a hirtelen fellépő nagy feszültség különbségeket meggátolja.

Az összes alkatrész a felső (Top) oldalra került. Bal oldalon találhatóak a csatlakozók, ahol bejön az alkatrészek számára a tápfeszültség, illetve az akkumulátorok felől érkező feszültség is ezeken a csatlakozókon jön be. A galvanikus leválasztást követően a jelek majd a jobb oldalon található csatlakozón keresztül jutnak el az sb-RIO-hoz.

Az elkészült PCB-t a 3.7, 3.8 ábra mutatja. A terv alapján készült áramkört a JLCPCB nevű prototípus gyártó cég gyártotta le.



ábra 3-7 A nyomtatott áramkör felső része



ábra 3-8. A nyomtatott áramkör alsó része

3.4 Összeszerelés

Az összeszerelés manuálisan, saját kezűleg történt kézi forrasztással.

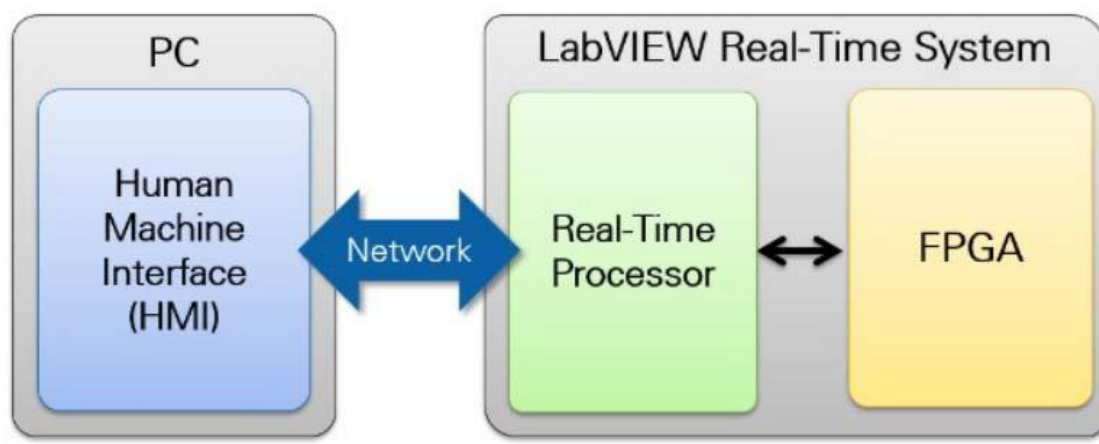


ábra 3-9. Az összeszerelt nyomtatott áramkör

3.5 Az adatfeldolgozó LabVIEW szoftver

Az adatfeldolgozó rendszer három szintre osztható (ábra):

- 1) Személyi számítógép (PC): a valós idejű rendszer, mely az adatok feldolgozását végzi, folyamatosan kommunikál egy PC-vel, melynek segítségével a felhasználó számára is láthatóak a mérési adatok.
- 2) sb-RIO 9636 vezérlő: valós idejű rendszer, mely az adatok feldolgozását illetve továbbítását végzi a személyi számítógéphez.
- 3) FPGA (Field-Programmable Gate Array): egy integrált áramkör, mely alkalmazás specifikusan programozható, lehetővé teszi a gyors adatbeolvasást, illetve több művelet párhuzamos futtatását. Az általa beolvasott adatokat feldolgozásra továbbítja az sb-RIO rendszernek.



ábra 3-10. Az adatfeldolgozó szoftver rendszer különböző szintjei [11]

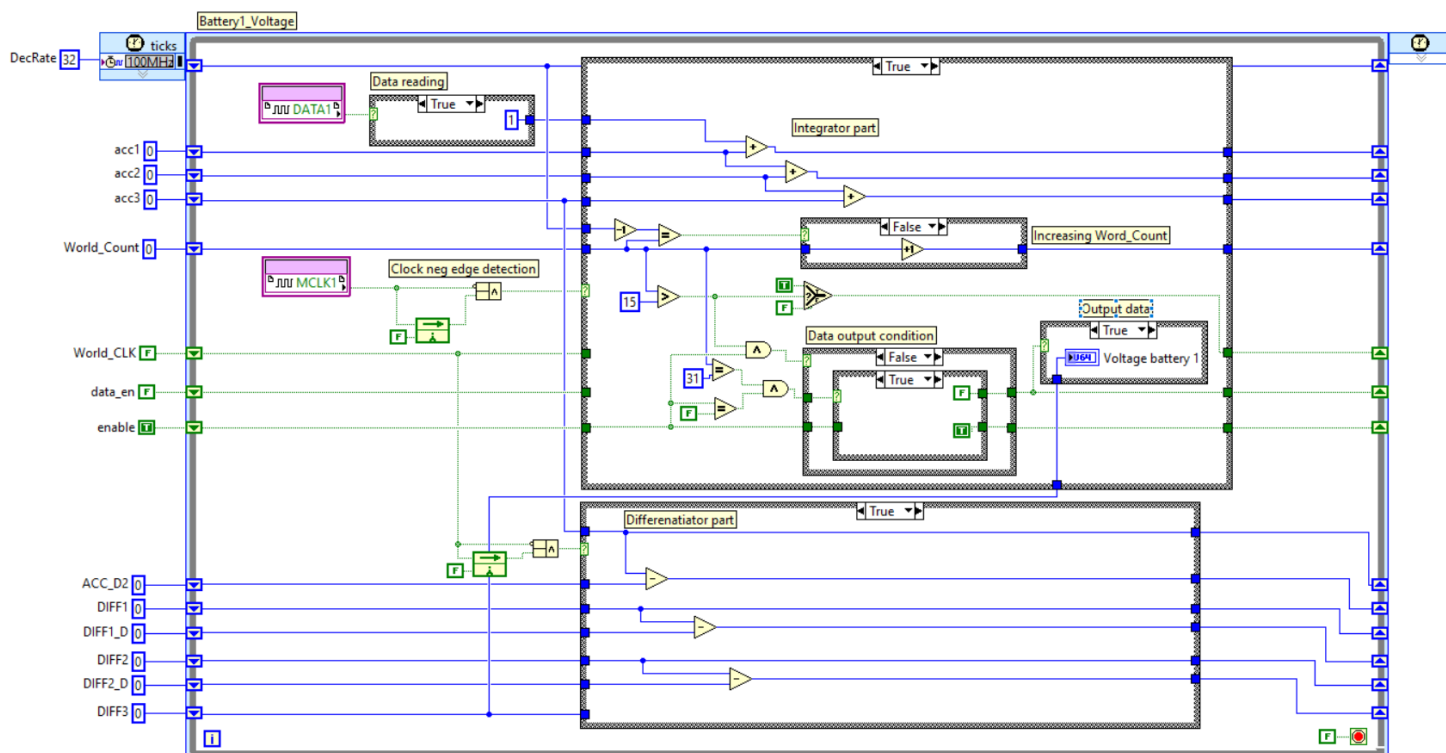
3.6 LabVIEW FPGA kód

Az analóg-digitális átalakító bejövő jelének feldolgozását, illetve az áramkörön található tranzisztorok vezérlését a FPGA digitális bemeneti/kimeneti pinjei valósítják meg. Az ADC beolvasásához szükséges egy digitális szűrő, mely a mintavételezés alatt keletkezett zajokat hivatott kiszűrni a pontos beolvasás érdekében.

A szűrő előbb egy sinc3 harmad rendű alul áteresztő szűrőből áll, melyet egy decimáló követ, mely csökkenti a sáv szélességet, illetve "kidobja" a mintavételek egy részét, mely által lehetőség nyílik arra, hogy a kimeneti jelet alacsonyabb frekvencián feldolgozni [12].

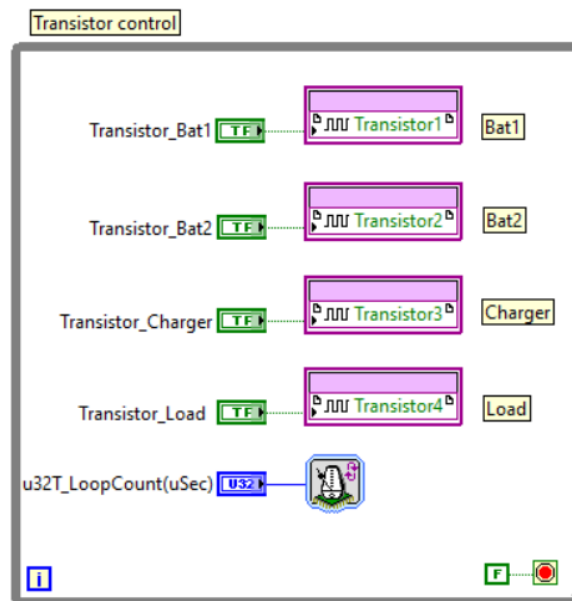
A LabVIEW kód (ábra 3-11) egy 100MHz-enként ismétlődő ciklusokból áll, mely alatt megtörténik az ADC kimentí jelének beolvasása, illetve szűrése.

Előbb az integráló rendszer folyamatosan adja össze a beérkező bit sorozat elemeit, majd decimálási arány, (*decimation ratio*) függvényében a rendszer elvégzi egy alacsonyabb frekvencián a sávszélesség csökkentését és az adatok továbbítását az sb-RIO fele. A decimálási arány értéke 32, az ADC adatlapja alapján volt kiválasztva. Összesen 3 szűrő fut párhuzamosan az FPGA-n, kettő a cellák feszültségeit, egy pedig a sönt ellenálláson található feszültséget méri, melynek segítségével kiszámítható az áram értéke.

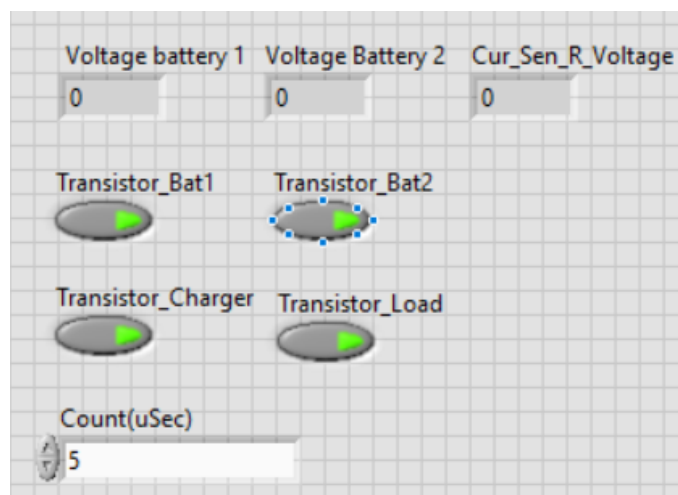


ábra 3-11. A digitális szűrő LabVIEW kódja

A tranzisztorok vezérlését a következő pin-ek végzik: Transistor1, Transistor2, Transistor3, Transistor4 (ábra 3-12). Ezek a kimenetek inverter kapukhoz csatlakoznak, ezért, annak érdekében, hogy a tranzisztorokat zárt állapotban maradjanak, állandóan logikai 1 értéket kell kapjanak (True). Az első két pin vezérli az akkumulátor cellák kiegyenlítését, a harmadik a töltési ram ki illetve bekapcsolását, a negyedik pedig terhelés alatt az áram ki valamint bekapcsolását.



ábra 3-12 a Tranzisztorok vezérlését végző program

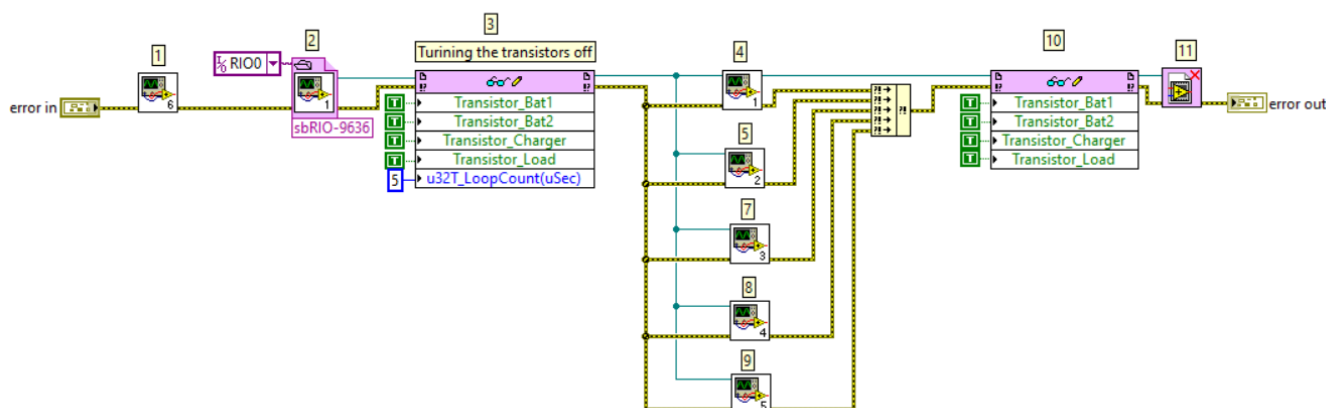


ábra 3-13 Az FPGA program panel része

A LabVIEW program panel részén láthatóak a kimeneti adatok: a két akkumulátor cellán mért, feszültség osztó segítségével leosztott feszültség, illetve a tranzisztorok logikai vezérlői, valamint ezek kimeneti pin-jeit vezérlő ciklus időzítése, mely 5 mikroszekundum.

3.7 Az sb-RIO rendszeren futó LabVIEW kód

Az adatok feldolgozását, valamint a tranzisztorok vezérlését az sb-RIO9636 vezérlőn futó LabVIEW kód vezérli, mely egy valós a vezérlő hardverrel egy valós idejű rendszert alkot (*real-time system*) (ábra 3-14).



ábra 3-14. Az sb-RIO 9636-ot vezérlő LabVIEW kód

A valós idejű rendszer összesen 10 részre bontható:

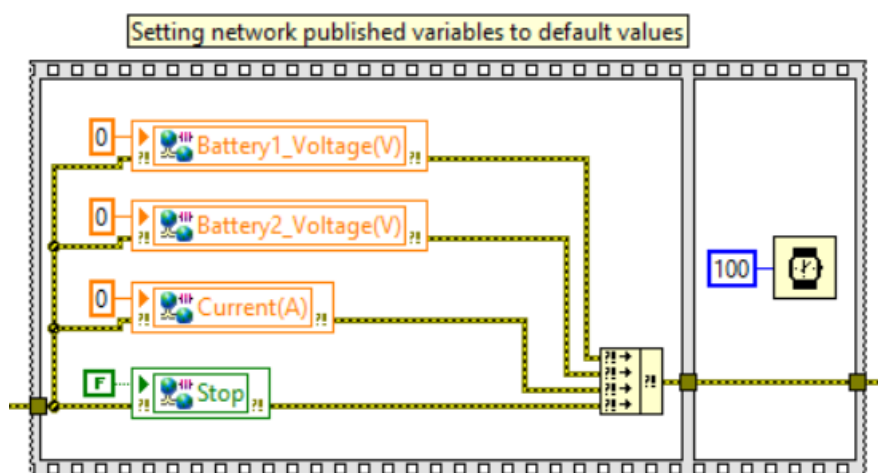
1. A hálózati változók beállítása alapértékre
2. A FPGA bit fájl beolvasása
3. A tranzisztorok alap helyzetbe való beállítása
4. A bejövő mért adatok feldolgozása és továbbítása a személyi számítógép felé
5. A terhelési áram ki-bekapcsolását végző tranzisztor vezérlése
6. Az akkumulátorok kiegyenlítése, amennyiben az első feszültsége nagyobb mint a másodiké
7. Az akkumulátorok kiegyenlítése, amennyiben a második feszültsége nagyobb mint az elsőé
8. Az terhelési áram automatikus megszakítása, amennyiben valamelyik cella feszültsége 2.6 V alá esik.
9. A Tranzisztorok kikacsolt állapotba való helyezése
10. Az FPGA bit fájl futtatásának lezárása

3.7.1 A hálózati változók beállítása alapértékre

A valós idejű beágyazott rendszer (Real-Time Embedded System), hálózati változók segítségével kommunikál a PC-vel (ábra 3-15).

Ezek a valós idejű változók a következők:

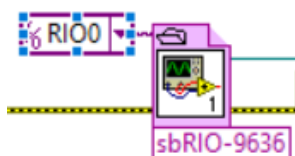
1. Battery1_Voltage-A első akkumulátor cella feszültségét tárolja Voltban
2. Battery2_Voltage-A második akkumulátor cella feszültségét tárolja Voltban
3. Capacity_Bat1-Az első akkumulátor cella kapacitását számolja mAh-ban
4. Capacity_Bat2-A második akkumulátor cella kapacitását számolja mAh-ban
5. Current- Az áram értékét tárolja A-ban
6. SOC_Bat1- Az első akkumulátor cella töltöttségi szintjét tárolja százalékban
7. SOC_Bat2- A második akkumulátor cella töltöttségi szintjét tárolja százalékban
8. Stop-a különböző párhuzamosan futó eljárásokat.



ábra 3-15 kódrészlet a változók beállításáról

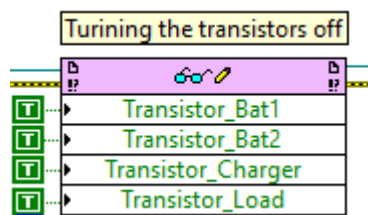
3.7.2 A bit fájl beolvasása és a tranzisztorok alapértékre való beállítása

Az FPGA-n futó LabVIEW programot egy compiler átalakítja VHDL kódá, és eltárolja az FPGA memóriájában. A valós idejű rendszer ezt a kódot fogja beolvasni és ezen keresztül kommunikál az FPGA-val (ábra 3-16).



ábra 3-16 Az FPGA referenciát megnyitó LabVIEW kód elem

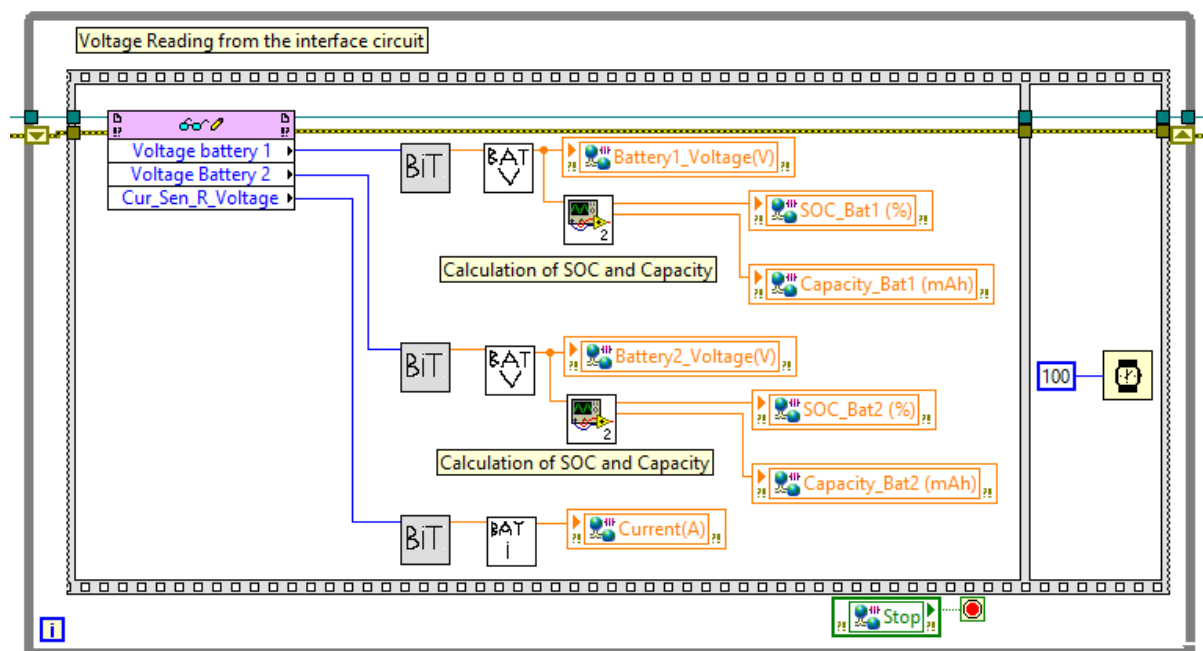
A tranzisztorok zárt állapotban tartása lényeges az áramkör védelme szempontjából, ezért mielőtt bármilyen feladatot végrehajtana a rendszer, előbb zárt állapotba helyezi őket.



ábra 3-17 A tranzisztorok kikapcsolása

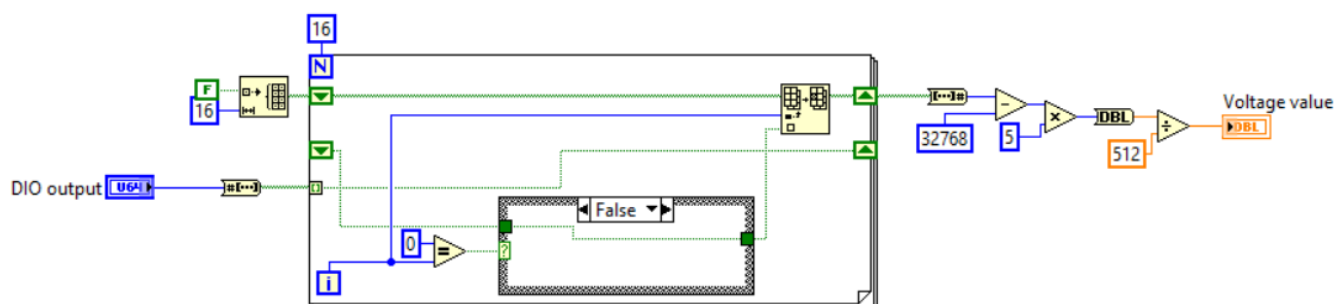
3.7.3 A mérési adatok feldolgozása

Egy folyamatosan futó ciklus vezérli a feszültségek beolvasását és feldolgozását. Több alprogram (*sub VI*) egyszerűsíti a kódot (ábra 3-18).



ábra 3-18 Az adatfeldolgozó programrész diagramja

A bit alprogram a logikai változókat egy tömbbe rakja majd átalakítja a logikai egész értékké. Ezt követően az adatlapban található értékek alapján kiszámítja a mért értéket.

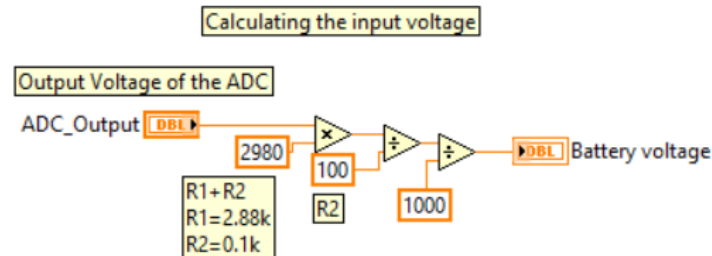


ábra 3-19. Logikai értékek egészszé történő alakítása

Az adatlap alapján a mért értékeket a következő képlet segítségével lehet kiszámítani:

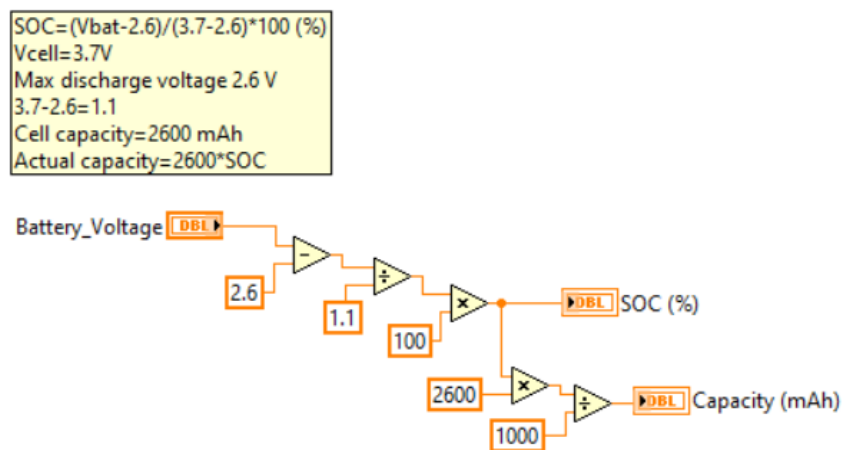
$$x = \frac{5y - 32768}{512}$$

A Battery_Voltage subVI a feszültség osztás előtti érték kiszámítását valósítja meg.



ábra 3-20 A feszültség osztás előtti érték kiszámítása

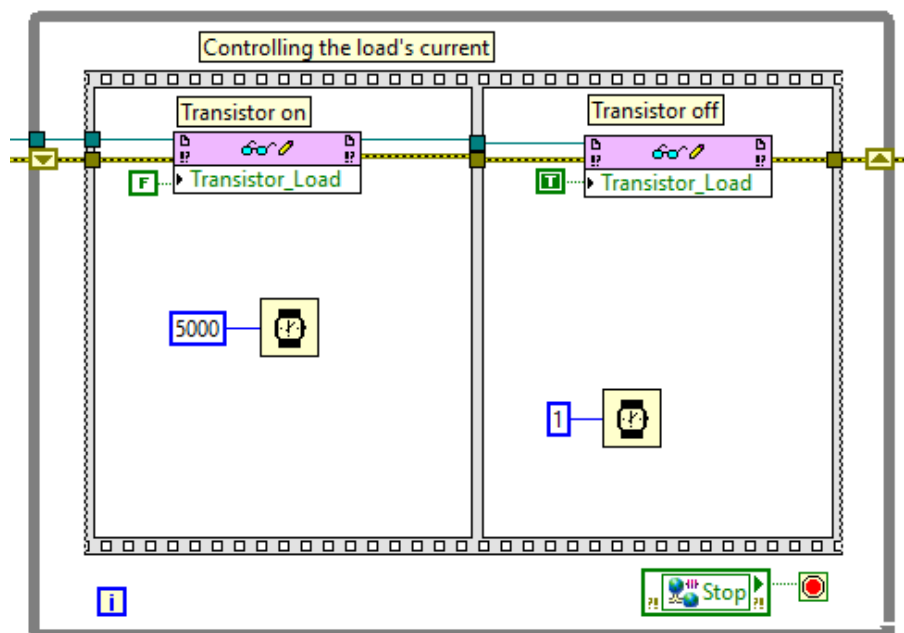
A töltöttségi szintet, valamint a kapacitást az átláthatóság érdekében szintén egy subVI végzi.



ábra 3-21 A töltöttségi szint és a kapacitás számítása

3.7.4 A terhelési áram ki, illetve bekapcsolása

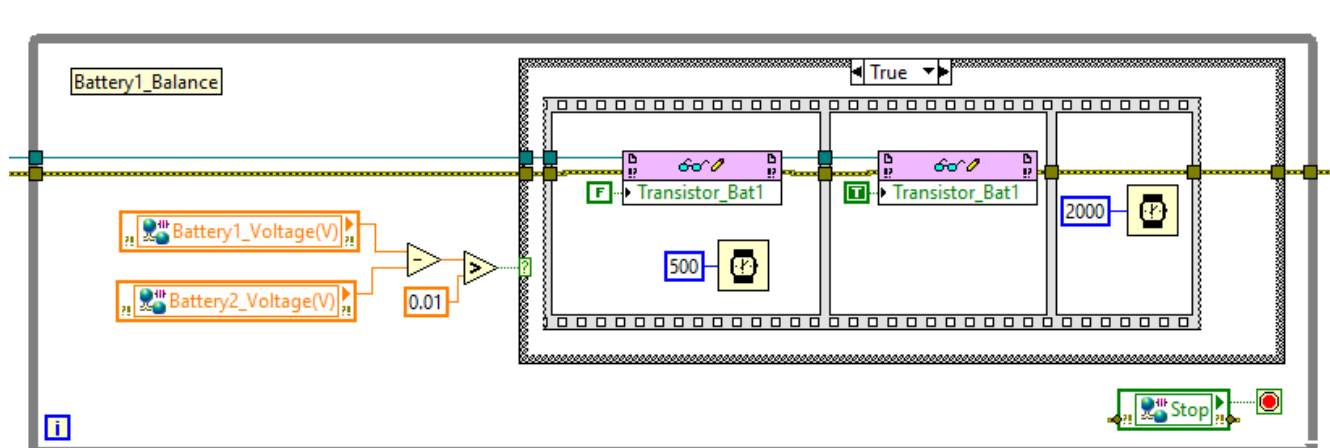
A terhelés ki, illetve bekapcsolás egy állandóan futó ciklusban történik, mely a jelenlegi beállítás szerint 5000 ms időtartamra bekapcsolja a tranzisztort, majd 1 ms időtartamra kikapcsolja (ábra 3-22). A tranzisztor kikapcsolásával a söntellenállások túlmelegedését akadályozza meg a rendszer.



ábra 3-22. A terhelés vezérlő tranzisztor ki-, illetve bekapcsolása

3.7.5 Az akkumulátor cellák kiegyenlítése

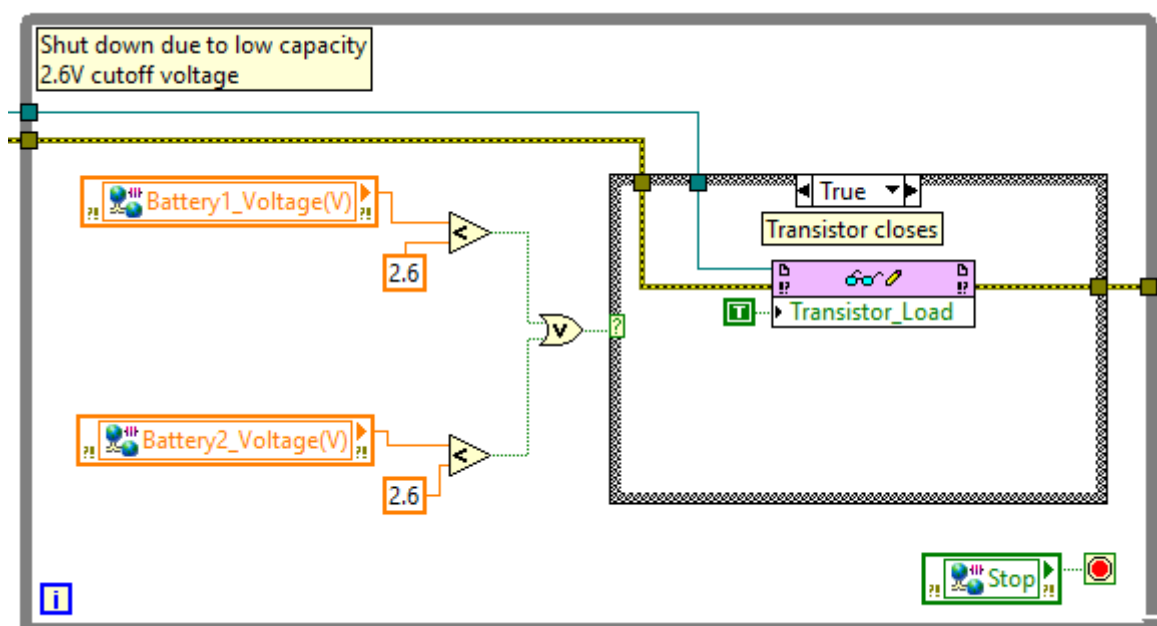
A rendszer folyamatosan figyeli a cellák feszültségeit. Amennyiben a mért, illetve számított értékek alapján a két cella közti különbség meghaladja a 0.01 V-ot, vagyis a 10 mV értéket a cellák kiegyenlítését a rendszer automatikusan megkezdi (ábra 3-23). Előbb 500 ms időtartamra kinyitja az illető cellán levő tranzisztort, majd bezárja, 2000 ms időtartamot várakozik, mely alatt stabilizálódik a feszültség értéke és ismét mér.



ábra 3-23 Az 1-es és 2-es cella feszültségének kiegyenlítése, amennyiben az 1-es feszültsége magasabb a 2-esnél

3.7.6 A terhelés automatikus lekapcsolása

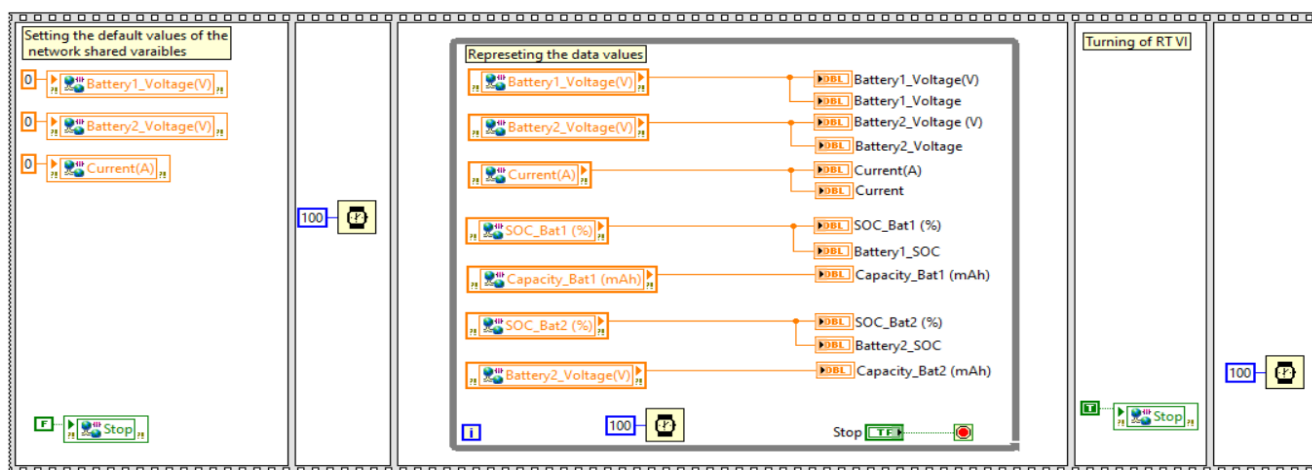
Amennyiben a rendszer azt érzékeli, hogy valamely cella feszültsége beesik 2.6 V alá, a rendszer automatikusan lekapcsolja a terhelést (ábra 3-1).



ábra 3-24 A terhelés automatikus lekapcsolása 2.6 V cella feszültség alá eséskor

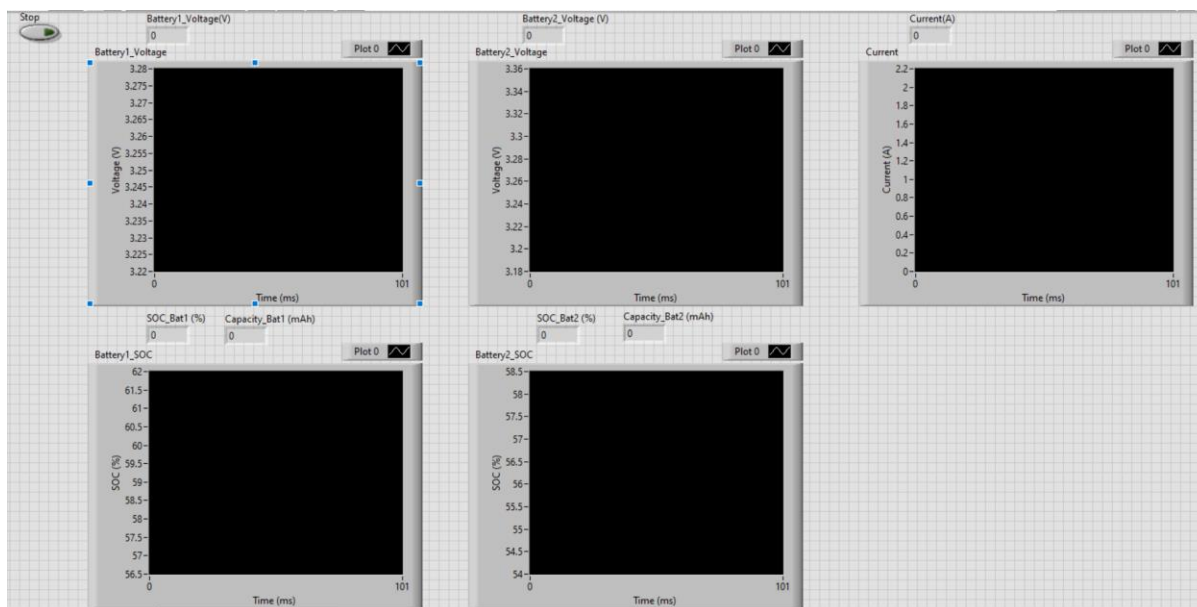
3.8 A Személyi számítógépen futó LabVIEW kód

A számítógépen futó VI első lépésben a hálózati változók egy részét átállítja az alapértékeikre, ezáltal megakadályozza, azt, hogy hibás értékek jelenjenek meg az elindulás első pillanataiban. Minden változó írás után 100 ms időt vár, hogy a hálózaton át biztosan eljussanak az adatok az sb-RIO rendszerhez (ábra 3-25).



ábra 3-25 A számítógépen futó LabVIEW kód

A hálózati változókat követően pedig egy ismétlődő ciklus indul el, mely a manuális kikapcsolásig folyamatosan olvassa az sb-RIO által mért, feldolgozott adatokat, és ezeket, egy grafikonon megjeleníti: a megjelenített adatok a következők:
1-es, 2-es cella feszültségei (V), töltöttségi szintje (%), kapacitása (mAh), az áram értéke (A). Az áram értékét, a feszültségeket és a töltöttségi szint változását egy-egy grafikon is szemlélteti (ábra 3-26).



ábra 3-26 A program front panel része, melyen a mérési adatok illetve a grafikonok találhatóak

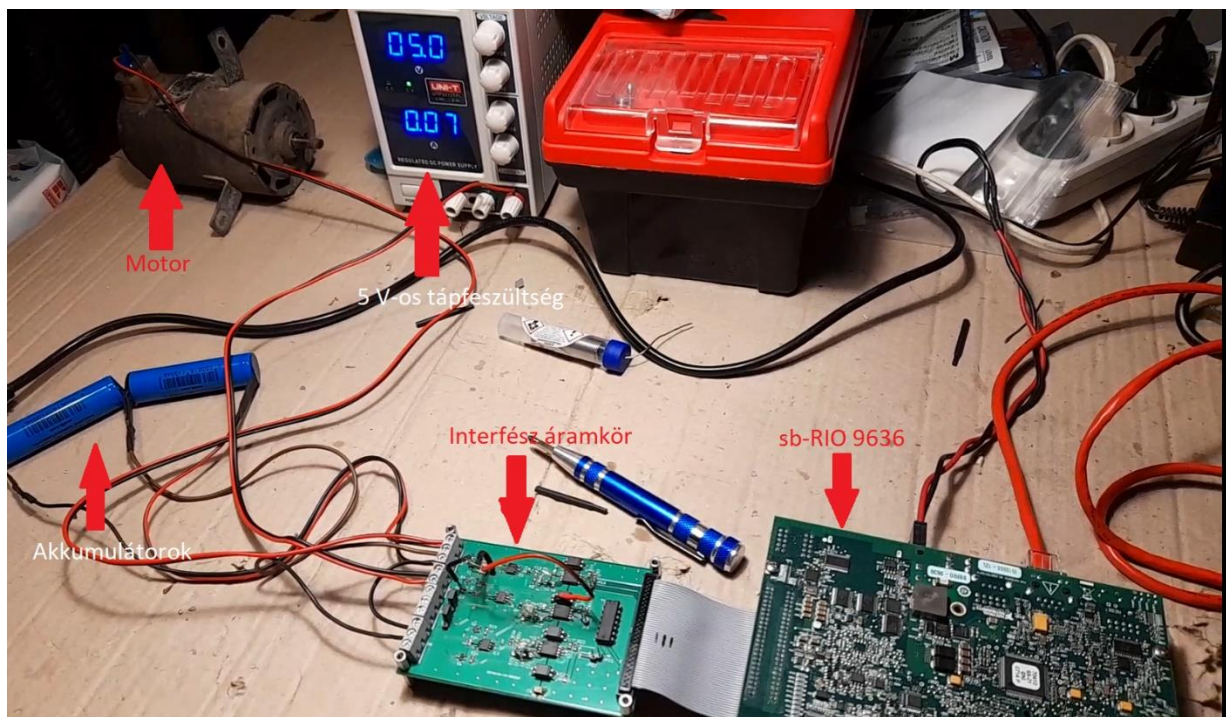
A PC-n futó program a stop gombra való kattintás esetén áll meg. Amennyiben a stop értéke logikai 1 (True), akkor kilép a program az olvasó ciklusból és logikai egy értéket ad a Stop hálózati változónak is, mely kikapcsolja az sb-RIO-n futó programot.

3.9 A rendszer tesztelése

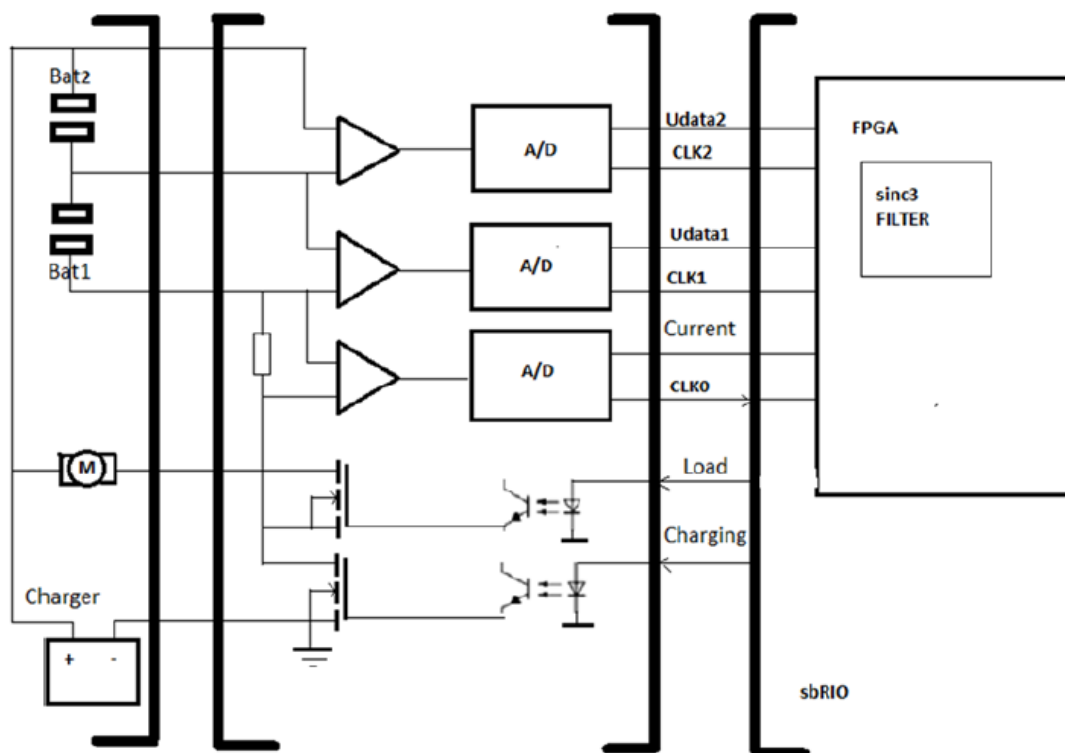
A rendszer tesztelése két darab egymással sorba kötött 18650 típusú Li-Ion cellával történt. A cellák adatai a következők:

- 1) feszültség: 3.7 V
- 2) Kapacitás: 2600 mAh

Az áramkör erős áramú részén egy külső tápegységről kapja az energiát 5 V értékben, míg a gyenge áramú részen az sb-RIO szolgáltatja az 5 V-os tápfeszültséget. Az akkumulátorok a rendszer bal oldalán található csatlakozókhoz kapcsolódnak. A terhelésként szolgáló motor az akkumulátorhoz csatlakozik az interfész áramkörön keresztül (ábra 3-27). A rendszer elemeinek kapcsolatát a 3-28-as ábra mutatja be.

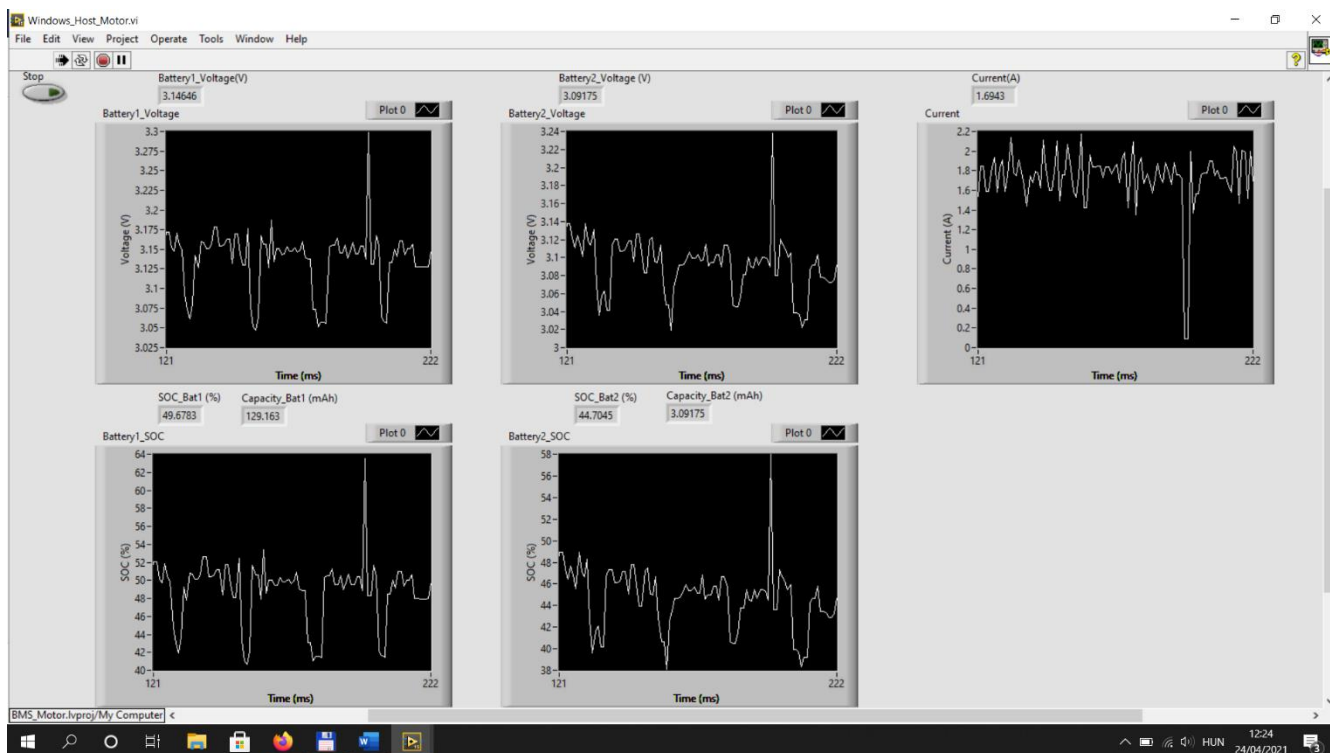


ábra 3-27. Az áramkör tesztelése



ábra 3-28. A rendszer egyszerűsített ábrája

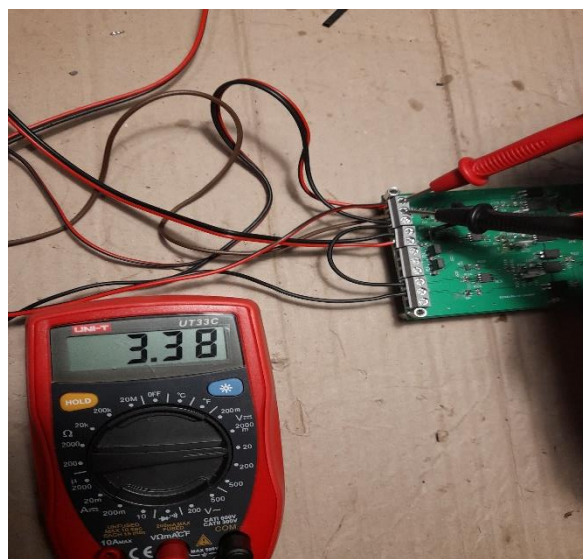
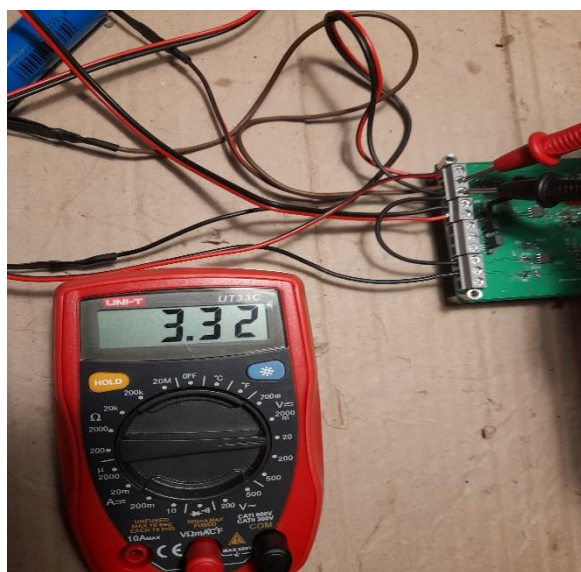
A rendszer összeszerelése és a szoftver elindulása után a program folyamatosan mutatja az a cella feszültségek, az áram, az SOC és a kapacitás értékét (ábra 3-29).



ábra 3-29. A rendszer által mért adatok

A rendszer által mért adatok 100 ms időközönként frissülnek. Az teszt indításakor 3.44 V illetve 3.40 volt az akkumulátorokon. A cella feszültségek ingadoznak annak függvényében, hogy a terhelés be van kapcsolva vagy nincs. Ennek következtében az SOC is folyamatosan ingadozik, jelen esetben 44% illetve 52 százalék között.

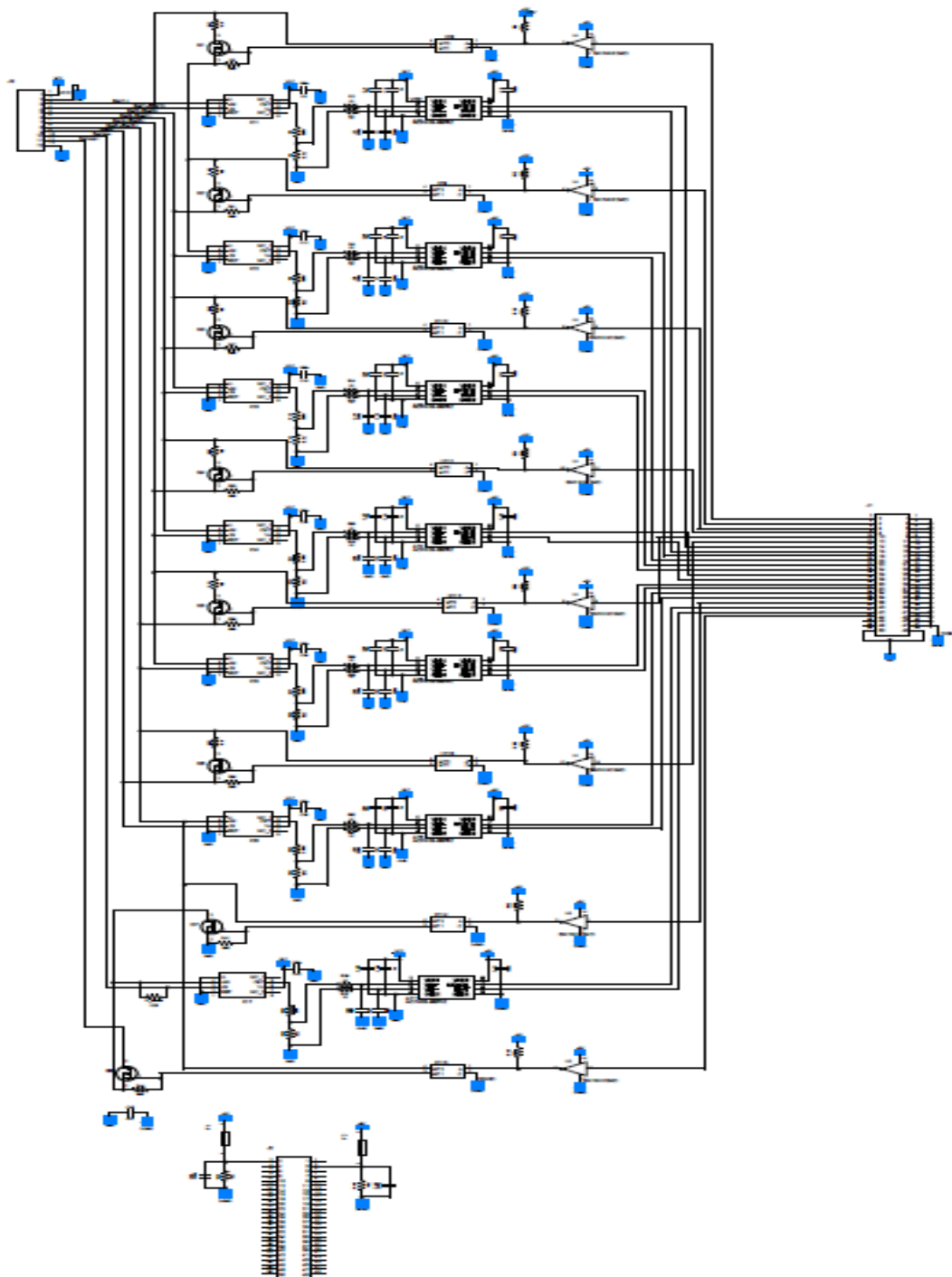
A lekapcsolás után a mindkét cella esetében a következő feszültség értékek jöttek ki kézi mérések alapján: 3.32 V illetve 3.38 V, a kettő közti különbség 0.06 V ami belül van a rendszer által meghatározott 10 mV értékű különbségen.



ábra 3-30. Az akkumulátorok feszültsége a rendszer kikapcsolása alapján

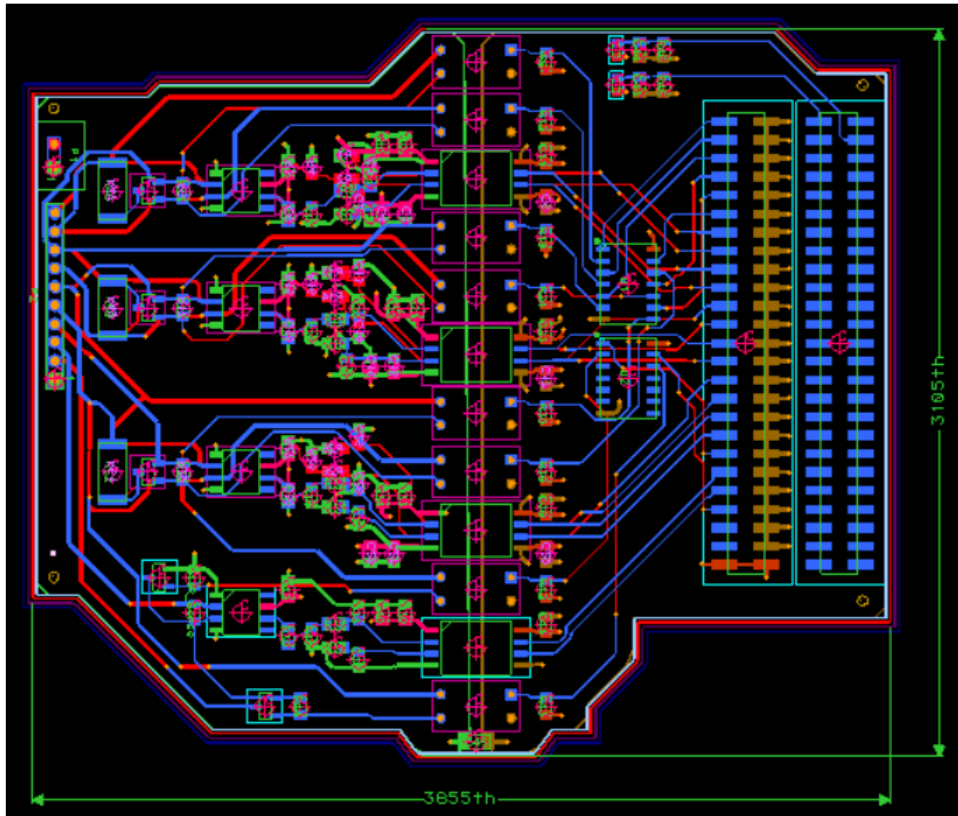
3.10 A hat akkumulátor felügyeletére alkalmazható interfész áramkör

A két akkumulátor felügyeletéhez szükséges interfész áramkör alapján terveztem Mentor Graphics PADS program segítségével egy hat akkumulátor felügyeletéhez alkalmas akkumulátor áramkört, mely hőmérsékelt mérésére is alkalmas.

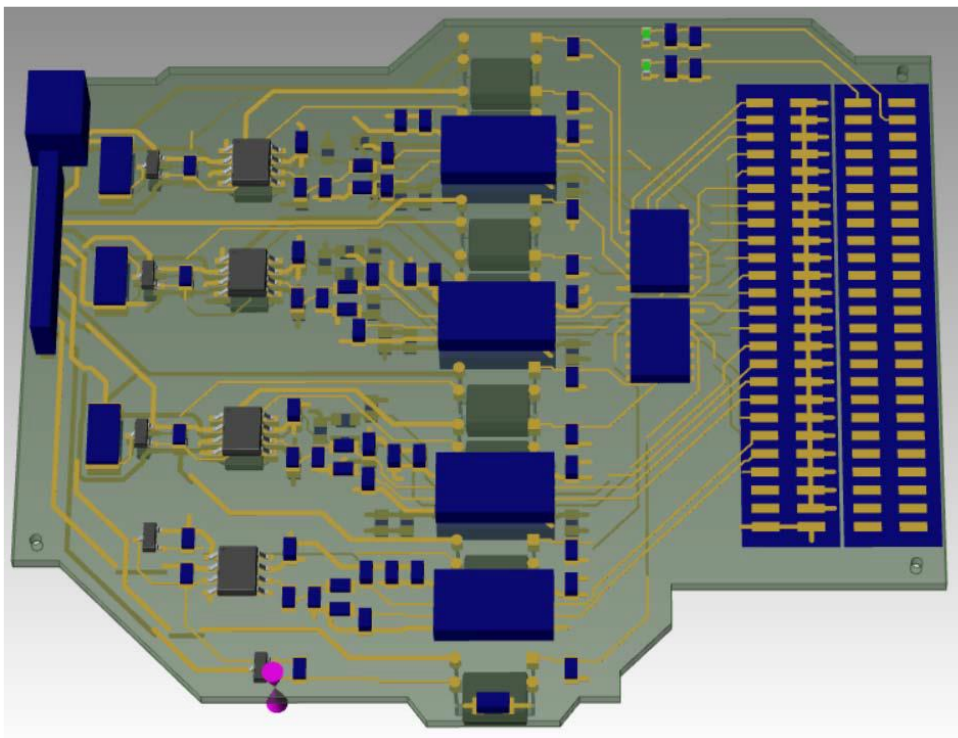


ábra 3-31. A hat akkumulátor felügyeletére használható interfész kapcsolási rajza

A kapcsolási rajz alapján a továbbfejlesztett változat nyomtatott áramköre is elkészült. Ez PCB négy rétegű.



ábra 3-32 A nyomtatott áramkör terve



ábra 3-33 A nyomtatott áramkör 3D modellje

A rétegek a következő struktúrát követik (ábra 3-34):

- 1) Jelréteg_1 (Signal_1)
- 2) Föld (GND)
- 3) Tápegység (PWR)
- 4) Jelréteg_4 (Signal_4)

	Visible	Color	Pour Draw Style	Layer Name	Type
1				DIELECTRIC_1	Dielectric
2	☒	Blue	None	SIGNAL_1	Metal
3				DIELECTRIC_3	Dielectric
4	☒	Green	None	GND	Metal
5				DIELECTRIC_5	Dielectric
6	☒	Cyan	None	PWR	Metal
7				DIELECTRIC_7	Dielectric
8	☒	Red	None	SIGNAL_4	Metal
9				DIELECTRIC_9	Dielectric

ábra 3-34 A PCB rétegein található elhelyezett jelek

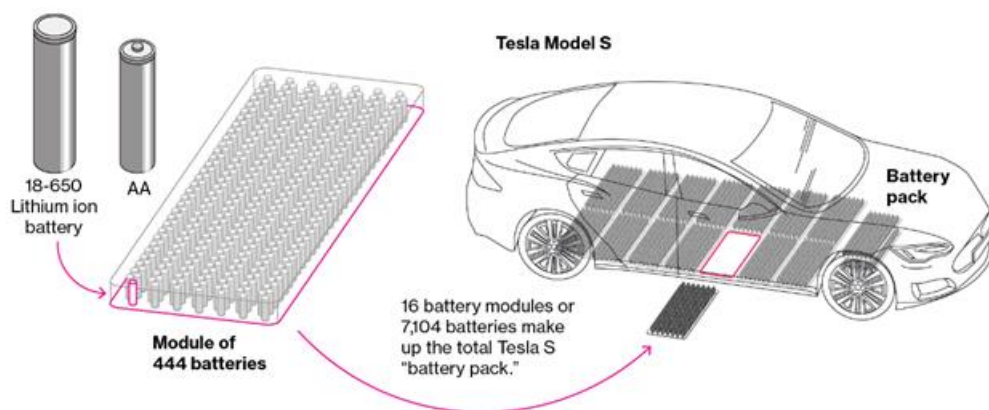
Az elkészült tervvel beneveztem a Mentor Graphics által tervezett PADS Professional Student Competition-re, melyen sikerült bekerülnöm az első 10 helyezett közé.

4 Gyakorlati alkalmazhatóság

4.1 Cella szintű akkumulátor felügyeleti rendszer

A rendszer a gyakorlati alkalmazásaként a tervezett rendszer alkalmas lehet arra, hogy akár egy elektromos autóban is felhasználható legyen. Kiindulásként egy Tesla Model S típusú autó akkumulátor telepét vizsgáltam meg.

Egy 85 kWh teljesítményű akkumulátor telep súlya körül-belül 540 kg és 7014 Li-Ion cellát tartalmaz, melyek 16 modulban vannak szétszétva. Minden modulban van 74 cella párhuzamosan kötve, illetve 6 cella sorban. A cellák kapacitása 3450mAh, feszültségük 3.7 Volt, méretük 18*65 mm [13]. Az akkumulátor telep jelenlegi struktúrájával nem lehet minden cellát felügyelni, csak a modulokat felügyeli a jelenlegi rendszer, így egy esetleges hiba kihathat az egész akkumulátor telepre. Példaként említhető amikor Shanghajban kigyulladt egy akkumulátor modul hibája következtében egy parkoló Tesla [14].



ábra 4-1. Egy Tesla Model S akkumulátor telepének felépítése [14]

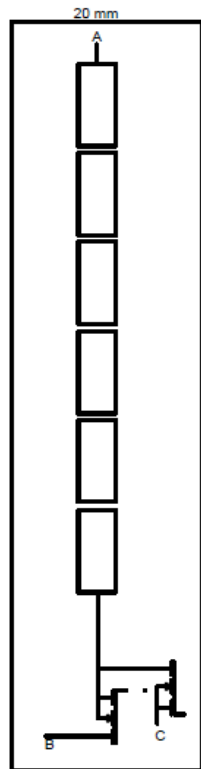
A 3-31. ábrán látható akkumulátor felügyeleti rendszert meg lehet valósítani egy 20 mm x 400mm méretű nyomtatott áramkörön, ha az sbRIO által felhasznált részt helyettesítjük egy integrált rendszerrel - *system on chip* - SoC. A 6 sorba kapcsolt cellát és felügyeleti rendszert Csoportnak (Group) nevezzük (ábra 4-2).

Megváltoztatjuk a Modul szerkezetét. Párhuzamosan kapcsolunk össze 74 Csoportot.

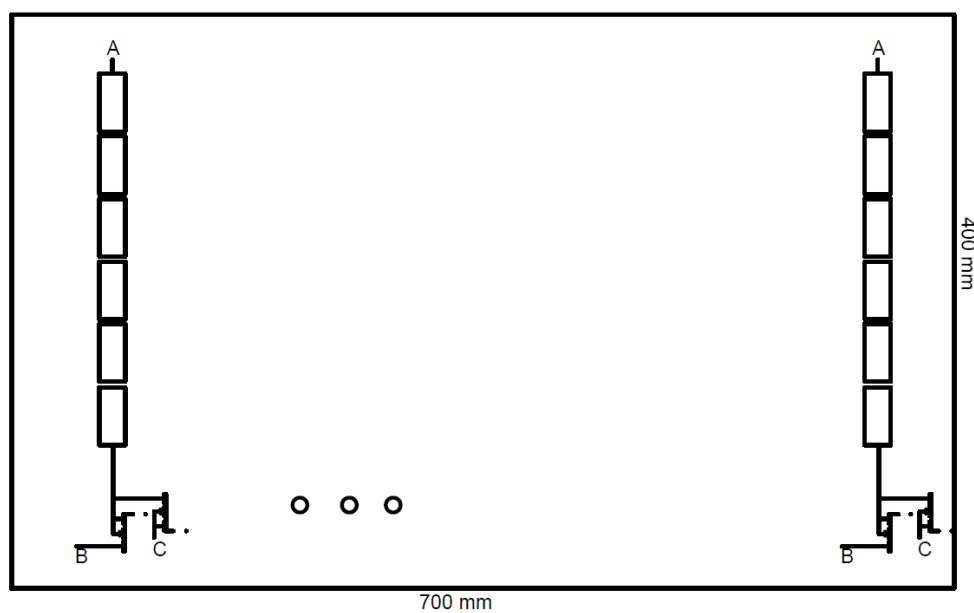
Az új Modul előnyei:

- Minden cella hőmérsékletét, feszültségét és áramát mérni tudjuk.
- A Csoportok a CAN bus-on keresztül kommunikálnának. (Controller Area Network)
- 16 Modult sorba kapcsolunk és akkumulátor tömböt alkotunk. A tömb CANbus-jára $16 \times 74 = 1184$ csoport csatlakozik.

Az új Modult 2 darab 400mm x 700mm nyomtatott áramkörön valósítjuk meg. Mindenik nyomtatott áramkör 37 Csoportot tartalmaz (ábra 4-3). A Csoportok A, B, C pontjait kapcsoljuk össze megfelelő vastagságú nyomvonalal. Egy elképzelt modul 2 lapból állna, összesen 74 csoportot tartalmaz. Az A és B pontra kötődik a terhelés, az A és C pontokra a terhelés.



ábra 4-2. Egy csoport szerkezete

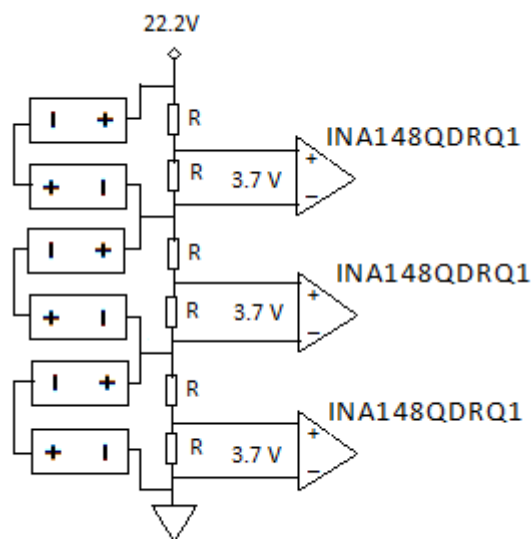


ábra 4-3. A 2 x 37 csoportot tartalmazó áramkör

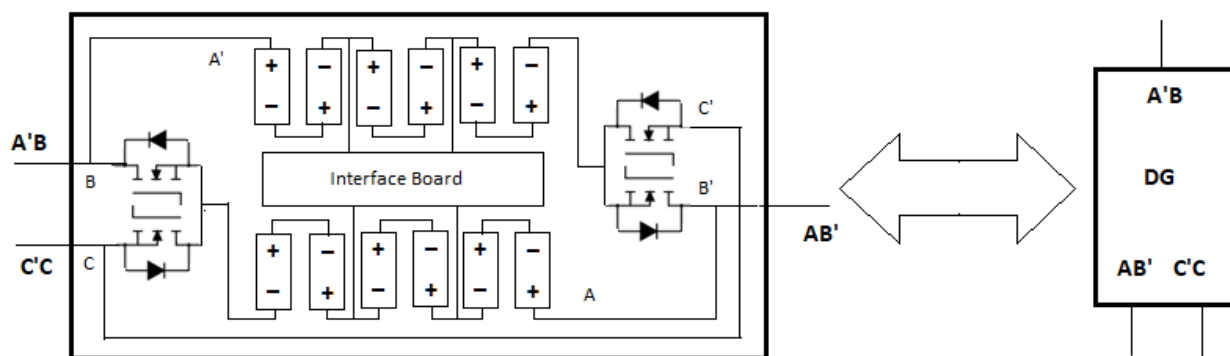
4.2 Cella szintű akkumulátor felügyeleti rendszer megvalósítása

Az elektromos autók ára az alkatrészek és az összeszerelés költségei következtében magasak. A költségek csökkentése érdekében, lényeges, hogy az összeszerelési folyamat minél jobban automatizálható legyen. Az akkumulátor csomag felépítését a következő észrevételek alapján lehet egyszerűsíteni:

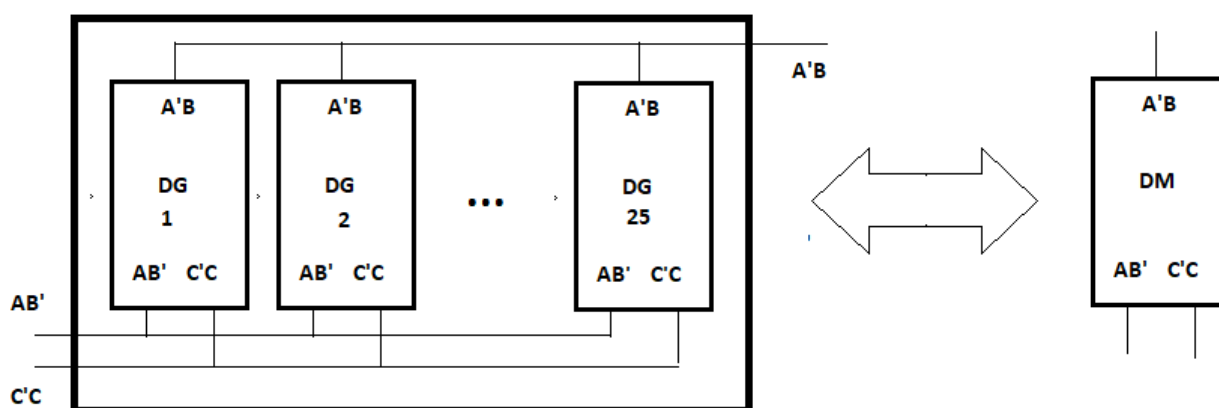
- Ha legalább 1 cella a 6 közül meghibásodik, akkor a csoportot a felügyelő rendszer kikapcsolja, hogy a Modul többi részének a működését ne zavarja meg. Innen arra a következtetésre jutottam, hogy az akkumulátor felügyeleti rendszerkét darab sorba kötött cellát felügyeljen. Az INA148QDRQ1 4V maximális bemenete lehet, ezért 2 cella feszültségét felezzük (ábra 4-4).
- Felére csökkentjük System on Chip (SoC) áramkörök számát ha két csoportot összekapcsolunk egy Dupla Csoportba (*Double Group, DG*), (ábra 4-5).
- 25 DG Dupla Csoportot párhuzamosan kapcsolva 1 **DM** Dupla Modult kapunk (ábra 4-6)
- 3 izolált egyenáramú átalakítóra lenne szükség a megvalósításhoz (isolated DC-DC converter)



ábra 4-4

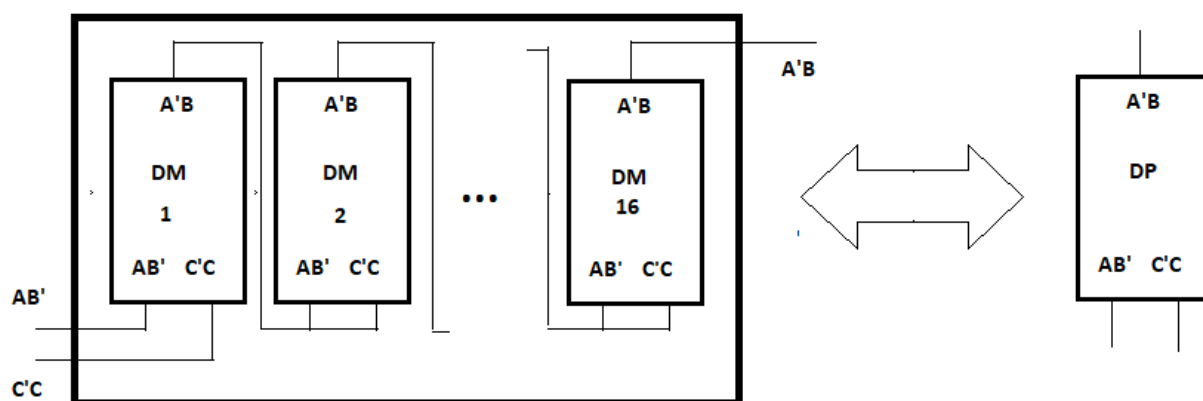


ábra 4-5



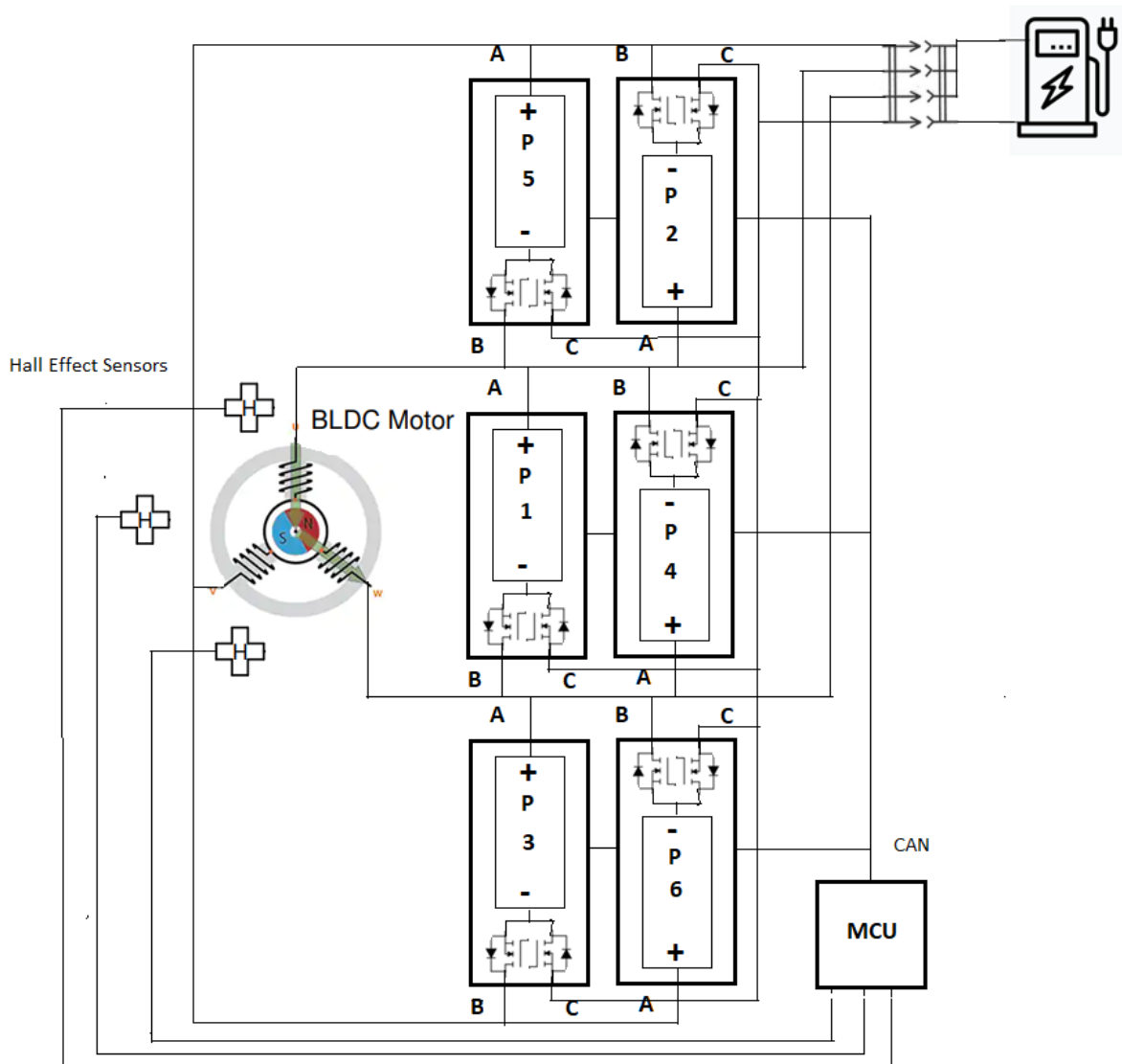
ábra 4-6

A 16 Dupla akkumulátor modult (DM) sorba kapcsolva **Dupla Tömböt** (*Double Packet, DP*) hozható létre, amely $16 \times 25 = 400$ Dupla csoportból (DG) áll és $400 \times 12 = 4800$ cellát tartalmaz. A tömb feszültsége 355,2 V és töltése $2 \times 86,25$ Ah (ábra 4-7).



ábra 4-7

A dupla akkumulátor tömböt be lehet építeni egy elektromos hajtásláncba. A váltó árama átalakító áramkört tartalmazó tranzisztorokat be lehet építeni az akkumulátort tartalmazó dupla tömbbe. A motor vezérlésekor sosem a teljes akkumulátor telepet merítjük, hanem mindig egy-egy dupla tömböt (ábra 4-8).



ábra 4-8

4.3 Fejlesztési tervek

Az eddigi fejlesztési lépések alapján a következő továbbfejlesztési lépések vannak eltervezve:

- 1) Az SOC algoritmus pontosítása és kibővítése Kálmán szűrő segítségével
- 2) Elektromos hajtások további tanulmányozása
- 3) System on Chip áramköri rendszer megtervezése

5 Következtetések

A jövőben fellépő akkumulátor igények kielégítésére, elengedhetetlen, az olcsó megbízható és pontos rendszerek létrehozása. Ezen dolgozatban bemutatott BMS rendszer kiválóan alkalmas arra, hogy elvégezze relatív olcsó ár mellett (kb. 500 RON) ezen rendszerek feladatait (feszültség-, árammérés, terhelési, töltési áram mérése, cellák kiegyensúlyozása, SOC számítás).

Mindemellett fontos kiemelni, hogy a gyenge áramú adatfeldolgozó rész védve van az esetleges rövidzárlatoktól, meghibásodásoktól a galvanikus leválasztásnak köszönhetően. Ha összehasonlítjuk más hasonló rendszerekkel, melyek Hall effektuson alapuló szenzorral, vagy pedig olyan műveleti erősítővel, mely galvanikus leválasztásra is képes, ezen rendszer egyszerűbb, ugyanis Hall effektuson alapuló rendszerek esetén a nagyobb értékű áramra van szükség pontos mérésekhez, viszont ennek következtében a teljesítmény veszteségek is nőnek. A speciális, galvanikus leválasztásra alkalmas műveleti erősítők pedig magas árral rendelkeznek, ami akár 220-600 RON is lehet (AD203).

A National Instruments által fejlesztett LabVIEW programkörnyezet, valamint sbRIO rendszer kiválóan alkalmas arra, hogy az adatfeldolgozást és vezérlést ellássa.

További fejlesztésként, a jövőben a rendszer skálázhatósága lenne fontos. A skálázhatóság lehetővé tenné, hogy a központi irányító rendszer akár több modul adatait is képes legyen feldolgozni. A rendszer alkalmazhatósága ezáltal sokkal szélesebb lenne, kettőnél több cella mérésére is alkalmassá válna. Ennek kivitelezéséhez mérőmodulok alkalmasak lennének arra, hogy a CAN kommunikációs protokollon keresztül kommunikálnának a központi egységgel.

Az autó ipar mellett az irányító, felügyelő rendszereket, ahol áram, feszültség és hőmérséklet mérést is alkalmaznak még a következő helyen lehet alkalmazni: energia tároló rendszerek nap, illetve szélenergia tárolóhoz, elektromos elosztórendszerek felügyelete.

Az akkumulátorok élettartama meghosszabbítható, a töltés irányításának, illetve az akkumulátor cellák kiegyensúlyozásának köszönhetően. A BMS rendszerek megkerülhetetlen szerepet fognak játszani a jövőben az energetika valamint autóipar átalakulásának következtében.

6 Hivatkozások

- [1] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, “Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 76–88, 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2089647.
- [2] R. Garcia-Valle and J. A. P. Lopes, *Electric vehicle integration into modern power networks*. 2013.
- [3] Villanyatósok, “Akkumulátor technológia: savas ólomakkumulátorok.” <https://villanyautosok.hu/2018/05/16/akkumulator-technologia-savas-olomakkumulatorok/>.
- [4] M. Bingeman, P. D. Engineer, and B. Jeppesen, “Improving Battery Management System Performance and Cost with Altera FPGAs,” no. May, pp. 1–16, 2016, [Online]. Available: https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01247-improving-battery-management-system-performance-and-cost.pdf.
- [5] F. Xue, Z. Ling, Y. Yang, and X. Miao, “Design and implementation of novel smart battery management system for FPGA based portable electronic devices,” *Energies*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/en10030264.
- [6] M. Murnane and A. Ghazel, “A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries,” *Analog devices*, 2017, [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/A-Closer-Look-at-State-Of-Charge-and-State-Health-Estimation-Techniques-....pdf>.
- [7] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, “Methods for state-of-charge determination and their applications,” *J. Power Sources*, vol. 96, no. 1, pp. 113–120, 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00560-2.
- [8] V. Pop, H. J. Bergveld, P. H. L. Notten, and P. P. L. Regtien, “A real-time evaluation system for a State-of-Charge indication algorithm,” *Symp. Metrol. Meas. Appl. Era Internet Work*. 2005, pp. 145–149, 2005.
- [9] Burr-Brown, “INA148 - $\pm 200V$ Common-Mode Voltage DIFFERENCE AMPLIFIER,” no. 520, 1999.
- [10] D. Sheet, “16-Bit , Isolated Sigma-Delta Modulator,” 2015.
- [11] “National Instruments.” <https://www.ni.com>.
- [12] B. Baker, “How delta-sigma ADCs work, Part 2,” *Analog Appl. J.*, no. 4Q, pp. 5–7, 2011, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slyt423/slyt423.pdf> <http://www.ti.com/lit/an/slyt438/slyt438.pdf>

438.pdf.

- [13] “Tesla Battery Structure.” [https://lt.ispardavimas2021.com/content?c=tesla battery pack weight&id=15](https://lt.ispardavimas2021.com/content?c=tesla+battery+pack+weight&id=15).
- [14] “Tesla says Shanghai car fire caused by failed battery module.” <https://phys.org/news/2019-06-tesla-shanghai-car-battery-module.html>.