



Li-ion akkumulátorok Kalman-szűrő alapú SoC és SoH becslése élettartamának optimalizálása érdekében

Lennert József Richárd

II. évfolyamos járműmérnöki MSc hallgató

Témavezető:

Dr. Fodor Dénes

Egyetemi docens

Győr

2024

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM ÚNKP-23-2-I-SZE-39 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL

FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”



TARTALOM

1. BEVEZETÉS	4
2. LI-ION AKKUMULÁTOROK BEMUTATÁSA.....	5
2.1. Működési elvük.....	5
2.2. Előnyök és hátrányok.....	14
2.3. Biztonsági szempontok.....	16
2.4. Gépjárművekben történő alkalmazás	20
2.5. Használatuk más területeken	21
2.6. Potenciális fejlődésük.....	22
3. LI-ION AKKUMULÁTOROK ÉLETTARTAMÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK BEMUTATÁSA.....	23
3.1. Hőmérséklet (Temperature).....	23
3.2. Töltöttségi állapot (State of charge [SoC]).....	25
3.3. Kisütés mélysége (Depth of discharge [DoD]).....	26
3.4. Különböző használati tartományok.....	27
3.5. C-arány.....	27
3.6. Töltés gyakorisága (Cycling frequency).....	29
3.7. Öregedés (Aging).....	29
3.8. Gyártás minősége (Manufacturing quality).....	30
3.9. Használati szokások (Usage patterns)	31
3.10. Nem megfelelő töltési szokások	32
3.11. Karbantartás (Maintenance).....	33
3.12. Akkumulátorcsomag kialakítása (Design of the batterypack).....	33
3.13. Akkumulátor menedzsment rendszerek (BMS)	34
4. LI-ION AKKUMULÁTOR MODELL MEGVALÓSÍTÁSA.....	35
4.1. Ekvivalens áramköri modell (ECM):	36
5. LI-ION AKKUMULÁTOR MODELL PARAMÉTEREINEK BECSLÉSE	40
6. LI-ION AKKUMULÁTOR ÁLLAPOT BECSLÉSÉNEK MEGVALÓSÍTÁSA	44
7. ÖSSZEFOGLALÁS	54
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	55

NÓMENKLATÚRA

SoC	Töltöttségi állapot	[%]
DoD	Kisütés mélysége	[%]
Q_n	A cella névleges kapacitása	[Ah]
Q	A cellában rendelkezésre álló kapacitás	[Ah]
Q_{eol}	az élettartam végi kapacitás	[Ah]
Cr	C-arány	[C]
i	Terhelési áram	[A]
U_t	Az akkumulátor kimeneti feszültsége	[V]
U_{open}	Nyitott áramkörüi feszültség	[V]
U_1	Első polarizációs feszültség	[V]
U_2	Második polarizációs feszültség	[V]
$U_{T,j}$	A j-edik ellenállás feszültsége	[V]
R_0	Ekvivalens belső ellenállás	[Ω]
R_1	Első polarizációs ellenállás	[Ω]
R_2	Második polarizációs ellenállás	[Ω]
R_j	A j-edik ellenállás	[Ω]
$R_{T,j}$	A j-edik ellenállás	[Ω]
C_1	Első polarizációs kapacitás	[F]
C_2	Második polarizációs kapacitás	[F]
t	Idő	[s]
t_{total}	A teljes idő, amely 1 iterációhoz szükséges.	[s]
t_{sz}	A modell szimulációjához szükséges idő (minden szimulációnál egyenlőnek tételezzük fel)	[s]
t_{totalP}	A teljes idő, amely 1 iterációhoz szükséges párhuzamosítással	[s]
T_s	Mintavételezési idő	[s]
τ_1	Első időkonstans	[s]
τ_2	Második időkonstans	[s]
δU_{open}	A nyitott áramkörüi feszültségének %-os változása N kisütést követően	[%]

δ_{Q_n}	Az cella névleges kapacitásának %-os változása N ciklust követően	[%]
δ_{R_j}	A j-edik ellenállás értékének %-os változása N ciklust követően	[%]
M_{th}	Az akkumulátor termikus tömege	$\left[\frac{J}{K}\right]$
N	A kisütési ciklusok referenciaszáma	[-]
n	Az eddigi kisütési ciklusok száma	[-]
E	Becslési hiba	[-]
y_{sim}	Szimulált válasz	[-]
y_{ref}	Mért/referencia válasz	[-]
x_b	Tervezési változó	[-]
F_o	Objektív függvény	[-]
N_p	Becsült paraméterek száma	[-]
N_{ls}	Vonalkeresések száma (értéke 1 2 vagy 3)	[-]
N_w	A MATLAB workerek száma	[-]
α	Várható becslési idő csökkenés	[-]
x	Állapotfüggvény	[-]
f	Folyamatfüggvény	[-]
h	Megfigyelésifüggvény	[-]
F	Állapotátmeneti mátrix	[-]
H	Megfigyelési mátrix	[-]
I	Egység mátrix	[-]
F_d	Diszkrétizált állapotátmeneti mátrix	[-]
H_d	Diszkrétizált megfigyelési mátrix	[-]
$\hat{x}$	Becsült állapot	[-]
$\hat{p}$	Becsült állapotbecslési hiba kovariancia	[-]
K	Kálmán-nyereség	[-]

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a különböző méretű és teljesítményű Li-ion akkumulátorok számos olyan eszközben megtalálhatók, amelyek az életünk szerves részét képezik. Legyen szó akár egy laptopról, egy mobiltelefonról vagy éppen egy elektromos gépjárműről. Ezen akkumulátorok élettartamát a használati szokásaink, valamint a használat körülményei nagy mértékben befolyásolják, amelyek megfelelő optimalizációjával és a szükséges beavatkozások biztosításával az akkumulátor élettartama nagy mértékben javítható. Különösen a nagyobb méretű és gyártási költségű, így például az elektromos gépjárművekben alkalmazott akkumulátorok esetében rendkívül fontos az optimális élettartam elérése, amelyet különböző úgynevezett BMS-ek (Battery management system) alkalmazásával igyekeznek megvalósítani.

Dolgozatom célja a Li-ion akkumulátorok hatékonyságát és élettartamát befolyásoló legkülönbözőbb tényezők felkutatása (mint például a hőmérséklet és a használati szokások) és az azok által kifejtett élettartam befolyásoló hatások elemzése. Emellett célom egy olyan akkumulátor modell megalkotása MATLAB/Simulink környezetben, amely a mérési adatokat felhasználó parametrizálást követően alkalmas a valós akkumulátor szimulálására. Végezetül célom ennek az akkumulátor modellnek a felhasználásával egy olyan szimulációs modell felépítése, amely alkalmas a paraméterezésnek megfelelő Li-ion akkumulátorok állapotának becslésére (SoC, SoH).

A kutatás során célom megállapítani a Li-ion akkumulátorok élettartama szempontjából azokat a legkritikusabb tényezőket, amelyek jól mérhetők, az akkumulátorra gyakorolt hatásuk egységesnek tekinthető, valamint jól modellezhetők. További célom egy olyan akkumulátor modell és állapotbecslő algoritmus megvalósítása, amely lehetővé teszi a modellnek megfelelő Li-ion akkumulátorok esetében a lehető legpontosabb SoC és SoH becslést.

2. LI-ION AKKUMULÁTOROK BEMUTATÁSA

Dolgozatom szempontjából elengedhetetlen az akkumulátorokat alkotó elektrokémiai cellák, az akkumulátorok és ezen belül is a Li-ion akkumulátorok megfelelő mértékű ismerete, így a következőkben célom az ehhez szükséges ismeretek bemutatása, valamint a kapcsolódó szakirodalom áttekintése.

2.1. Működési elvük

Minden akkumulátor legfontosabb építőeleme az úgynevezett elektrokémiai cella, ugyanis az ebben található anyagok határoznak meg minden egyes teljesítmény jellemzőt. Azonban elmondható, hogy minden cella a benne található anyagoktól függetlenül alapvető szabályok szerint működik. A cellában minden esetben egy redoxireakció játszódik le, amely lehet reverzibilis vagy irreverzibilis. Az elektrokémiai cella a kisülés során galvanikus cellaként viselkedik, azaz kémiai energiát alakít át elektromos energiává még a töltés során elektrolitikus cellaként viselkedik, azaz elektromos energiát alakít át kémiaiá. Ebből következik, hogy a különböző elektrokémiai cellák esetében rendkívül fontos, hogy az elektrokémiai folyamat csak egy irányba mehet végbe, azaz a cella teljesen galvanikus vagy mindkét irányba lejátszódhat, azaz a cella elektrolitikus tulajdonsággal is rendelkezik

A cellák között megkülönböztetünk elsődleges (primary) és másodlagos (secondary) cellákat. Ezek között a legfontosabb különbséget a természetük jelenti, amely meghatározza újratölthetőségüket, valamint a fajlagos energiájuk jelenti. Az elsődleges cellákról elmondható, hogy fajlagos energiájuk nagyobb és tárolás közben az alacsonyabb kisülési sebességüknek köszönhetően kevesebb tárolt energiát vesztenek, azonban természetüket tekintve teljesen galvanikusok, így csak kémiai energiát képesek elektromos energiává alakítani, azaz nem újratölthetők. Éppen ezért elsődlegesen olyan eszközöknél kerülnek alkalmazásra, amelyek alkalmi jellegű energiavételezést igényelnek vagy használati jellegükből adódóan nem lenne gazdaságos vagy megoldható újratöltésük (pl. katonai eszközök). A cellák másik csoportját a másodlagos cellák adják, amelyek legfontosabb jellemzője és előnye, hogy galvanikus és elektrolitikus tulajdonságuk is van, azaz az elektrokémiai folyamat nem csak egy irányban játszódhat le bennük, amelynek köszönhetően többször használatosak, azaz újratölthetők. Hátrányuk, hogy az elsődleges cellákhoz képest kisebb fajlagos energiával rendelkeznek, valamint az újratöltések során a másodlagos cellák degradálódnak, illetve a töltés során az cellákban bizonyos mértékű stressz is keletkezik, amely nem megfelelő töltési kondíciók esetén akár a cella visszafordíthatatlan károsodásához is vezethet. A Li-ion alapú cellák között is vannak, amelyek elsődleges cellaként működnek és vannak olyanok is, amelyek másodlagos

cellaként. Dolgozatomban a másodlagos cellákkal és a belőlük készített akkumulátorokkal, valamint akkumulátor csomagokkal fogok foglalkozni és az elsődleges cellákról csak indokolt esetben fogok szót ejteni. Ennek okai egyrészt a dolgozat nyújtotta területi korlátokban másrészt a két cellatípus jellegében és applikációjában jelentkező szignifikáns eltérésekben keresendők. [1.]

Az elektrokémiai cellák alapvetően 6 fő részre oszthatók, amelyek az úgynevezett elektródok az anód és a katód, az elektrolit, a szeparátor, az áramgyűjtő, valamint a burkolat. Alapvetően minden egyes alkotórészről elmondható, hogy kihat a cella teljesítményére, valamint meghatározza annak lehetőségeit és korlátait. A cellán belül megkülönböztetünk aktív és passzív komponenseket. Az aktív komponensek közvetlenül részt vesznek a cellában zajló redoxireakcióban még a passzív komponensek közvetlenül nem vesznek részt benne.

Az elektrokémiai cellának két aktív komponense van az **anód** és a **katód**, amelyeket összefoglaló néven **elektródoknak** is nevezhetünk. Az anód mindig negatív még a katód mindig pozitív. Az elektródok elektromosan és ionosan vezető anyagok, amelyek lehetnek fémes vagy úgynevezett „insertion” típusúak [2.]. A fémes elektródok esetén az elektrokémiai folyamat csak a legkülső felületi rétegen megy végbe, még az „insertion” típusú elektródok esetében a redoxireakció az egész elektródban megy végbe. A Li-ion cella esetében az anód alapját egy vékony rézfilm adja, amelyet valamilyen direkt erre a célra előkészített általában szén alapú anyaggal (az esetek többségében grafit) vonnak be majd a megfelelő eljárásokkal a célnak megfelelő elektródává alakítanak. Ezzel szemben a katód alapját egy alumíniumfilm adja, amelyet megfelelően előkészített fém oxidokkal például kobalt (Co), mangán (Mn), nikkel (Ni) vonnak be majd alakítanak elektróddá. [1., 3.]

A cella többi része nem vesz részt közvetlenül a redoxireakcióban, így az elektrolitot, a szeparátort, az áramgyűjtőt, valamint a burkolatot passzív komponensnek tekinthetjük.

Az **elektrolit** az esetek többségében egy oldat, amelyet egy vagy néhány só, egy vagy több oldószerben történő feloldásával hoznak létre. Éppen ezért megjelenése egyszerű, azonban mégis egy kritikus szerepű komponens, amely a dinamikus összteljesítmény szempontjából nélkülözhetetlennek tekinthető. Szerepe rendkívül sokrétű hiszen egyrészt összekötő kapocsként szolgál az elektródák között, azonban el is választja őket így gátolva meg a cellán belül keletkező rövidzárlatokat. Legfontosabb feladata, hogy ne elektronokat, hanem ionokat vezessen éppen ezért rendkívül fontos, hogy gyors ionvezetést biztosítson miközben a redoxireakciót semmilyen mértékben sem gátolja. Az elektrolitnak azonban nem csak

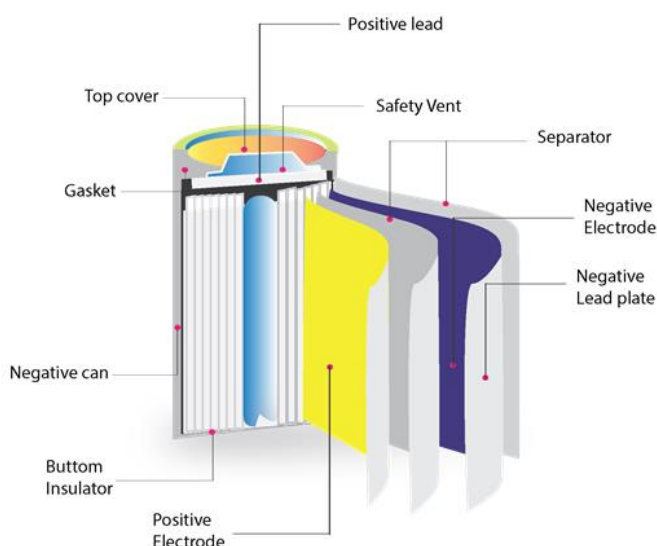
ionvezetési hanem mechanikai tulajdonságai is fontosak éppen ezért bizonyos esetekben az elektrolit nem folyadék, hanem gél vagy szilárdtest (pl. polimer), amely jobb mechanikai tulajdonságokat biztosít az ionvezetési képesség rovására. Végezetül különösen fontos, hogy az adott elektrolit kompatibilis legyen az alkalmazott elektródokkal, azaz stabil legyen a cella teljes feszültségtartományában és ne veszítsem teljesítményéből az idő múlásával sem. A Li-ion cellák esetében az elektrolit leggyakrabban folyadék, amelyet lítium sók szerves oldószerben történő oldásával hoznak létre. Az oldathoz továbbá különböző karbonátokat adnak a jobb vezetőképesség és nagyobb optimális hőmérsékleti tartomány reményében, valamint egyéb sókkal is igyekeznek javítani az elektrolit tulajdonságait (például gázképződés csökkentése). Ez az oldat azonban gyúlékony, így a jövő egyik fontos kihívása lesz egy nem vagy kevésbé gyúlékony elektrolit létrehozása. A Li-ion elektrolit eredendően nem tekinthető stabilnak. Azt az anódon keletkező úgynevezett SEI réteg teszi azzá, amely mondhatni szeparátorként viselkedik. Ez a réteg ugyan csökkenti a cella kapacitását, azonban biztosítja a rendszer stabilitását és hosszú élettartamát, így a cellában megfelelő működéséhez elengedhetetlennek tekinthető. [4.,5.]

A **szeparátor** általában egy porózus membrán, amelyet folyadék elektrolitok esetében használnak, hogy javítsák a cella mechanikai tulajdonságait, valamint gátolják az elektródok direkt kontaktját, ezzel is megakadályozva a belső rövidzárlatok kialakulását. A szeparátor elkészítéséhez gyakran, valamilyen szál struktúrák anyagot használnak, amely lehetőséget kínál arra, hogy a főbb tulajdonságokat finom hangolják az adott cellának megfelelően. Az anyag kiválasztásánál rendkívül fontos a jó ionvezetési képesség, valamint, hogy az adott anyag elektromosan szigetelő legyen. Mivel a szeparátor feladata a cella mechanikai tulajdonságainak javítása is, így kiválasztásánál fontos szempont a mechanikai- és kémiai stabilitás, valamint a mechanikai erő. Emellett fontos, hogy az adott szeparátor megfelelő porozitással is rendelkezzen. [2.,4.]

Az **áramgyűjtő** az elektrokémiai cella szintén fontos alkotóeleme, hiszen a cella megfelelő töltéséhez és kisütéséhez nélkülözhetetlen, hogy az elektronok a lehető leghatékonyabban áramoljanak az elektródák között. Az áramgyűjtőnek jellegét tekintve számos kritikus feltételnek kell megfelelni, hiszen jelentős elektromos vezetőképességgel kell rendelkezni, azonban a cellában található elektrokémiai környezetben stabilnak is kell maradnia, hogy ne befolyásolja a cellában lejátszódó redoxireakciót. Továbbá javítania kell a cella mechanikai tulajdonságait és lehetővé kell tennie a cella számára a felesleges hőmérséklet leadását is. Ez azért fontos mivel a cella túlmelegedése annak károsodásához vagy szélsőséges esetben akár

öngyulladásához is vezethet, azonban a cella minden egyes részének megfelelő direkt hűtése nem, vagy csak nagyon körülményesen oldható meg, így a megfelelő hőelvezetés rendkívül fontos. Anyaga lehet például alumínium vagy réz. [1.]

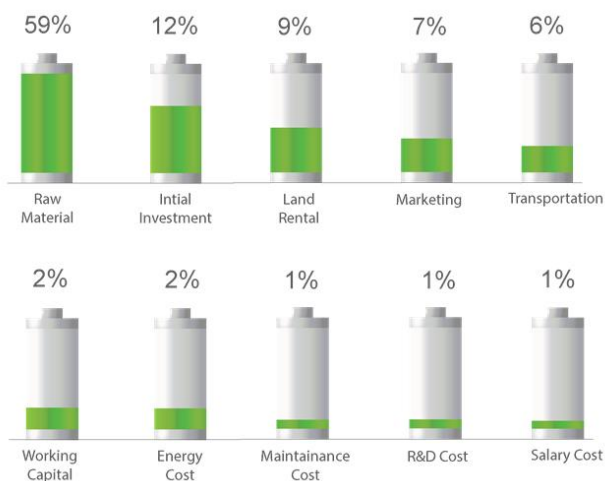
A **burkolat** vagy **borítás** adja meg az elektrokémiai cella végső stabilitását és egyúttal védi azt a külső behatásokkal szemben, valamint meggátolja, hogy a cella a benne lejátszódó folyamatok során károsodjon vagy megsemmisüljön [6.]. Másik fő feladatának a cella alkotóelemeinek helyben tartása, valamint az elektrolit elpárolgásának megakadályozása tekinthető, amelyek szintén kulcsfontosságúak a cella megfelelő, stabil működéséhez és hosszú élettartamához. A burkolat kialakítását tekintve a cella lehet hengeres, szögletes vagy tasakos. A hengeres kialakítás magas fajlagos energiát, jó mechanikai stabilitást, könnyen automatizálható és alacsony költségű gyártást, valamint olyan biztonsági tényezőket tesz lehetővé, amelyek más formájú kialakítás esetében nem lehetségesek. A hengeres kialakításnak számos előnye van, azonban alakjából adódóan akkumulátor létrehozása esetén egyáltalán nem helygazdaságos, ezért általában hordozható eszközökben használják. A szögletes kialakítású cellák sokkal helytakarékosabbak, azonban gyártásuk is költségesebb. A helytakarékoság miatt ezekből a cellákból optimálisabb akkumulátorokat létrehozni, így például elektromos hajtásokban használják őket. Végezetül beszélhetünk tasakos cellákról, amelyek könnyűek és költséghatékonyak, azonban a nedvességre és magas hőmérsékletre rendkívül érzékenyek. Ezeket a cellákat a szögletes cellákéval megegyező területen használják. [1.,7.]



1. ábra Hengeres Li-ion cella felépítése [7.]

Az elektrokémiai celláknak számos követelményt kell teljesíteniük, hogy ténylegesen életképes energiatároló eszközként tekinthessünk rá. Először is fontos, hogy ezeknek a celláknak nagy legyen a fajlagos energiájuk, valamint a fajlagos teljesítményük, ezzel is

biztosítva a megfelelő mértékű terhelhetőséget. Emellett fontos, hogy biztonságosak legyenek, azaz a cellák normál körülmények között stabilan működjenek ez azért fontos mert bizonyos megoldásokkal a fajlagos energia jelentősen növelhető, azonban ezek a megoldások sok esetben nem stabilok, így kereskedelmi forgalomban történő alkalmazásuk nem kivitelezhető, ameddig nem teljesítik a megfelelő biztonsági kritériumokat. Fontos, hogy mind a cellák mind pedig a belőlük létrehozott akkumulátor csomagok tartósak legyenek, azaz az feladatukat hosszú évekig képesek legyenek ellátni [1.]. Ez nem csak azért fontos, mivel cseréjük sok esetben bonyolult és költséges, hanem azért is, mivel a tartósság feltételének tekinthetjük, hogy feladatukat az élettartamuk alatt megbízhatóan látják el. Sajnos a tartósságuk azonban nem csak a tervezésüktől függ, hanem attól is, hogy használatuk hogyan történik, hiszen a nem megfelelő használattal élettartamuk jelentősen csökkenthető. További kritériumként említhető a megfizethetőség, hiszen csak olyan cellák és akkumulátor csomagok fognak forgalomba kerülni, amelyeket a piac képes és hajlandó is megfizetni. A megfizethetőség azonban számos faktortól függ, hiszen az alapanyag árak, a gyártási költségek és számos egyéb tényező is befolyásolja azt, ahogy azt a 2. ábra is szemlélteti. [8.]



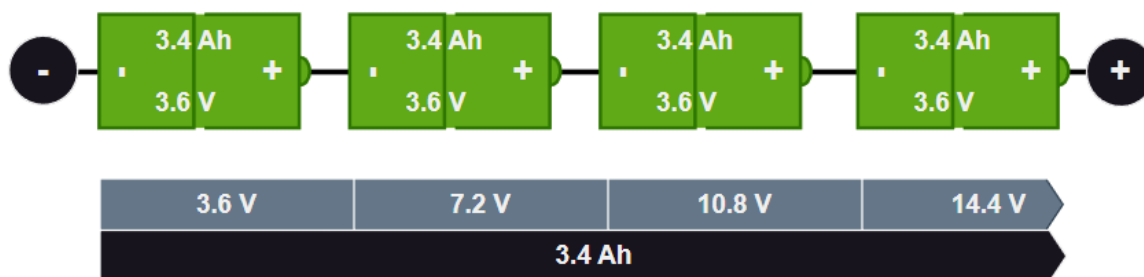
2. ábra Li-ion cella előállítási költségeinek megoszlása [8.]

A környezetvédelem egyre nagyobb mértékű felerősödése miatt fontos szemponttá vált a cellák méreganyagtartalma. Ebből következőleg egyre fontosabbá válik, hogy a cellák a lehető legkevesebb mérgező anyagot tartalmazzák és újrahasznosításuk is minél nagyobb mértékben megoldható legyen. Emellett lényeges kritérium a minél nagyobb működési tartomány, amely elsődlegesen a hőmérséklet szempontjából kritikus és a jövő egyik nagy kihívásának tekinthető, hiszen a túl alacsony hőmérséklet lassítja az elektrokémiai folyamatokat még a túl magas hőmérséklet csökkenti a cella élettartamát és veszélyezteti annak működését. Fontos, hogy a cellák minél kisebb önkisüléssel rendelkezzenek, hiszen enélkül hosszú távú tárolásuk nem

megoldható. Sajnos a másodlagos elektrokémiai cellák esetében az önkisülés mértéke jóval nagyobbak tekinthető, mint az elsődleges celláké, amely korlátozza a tárolási lehetőségeiket. Végezetül meg kell említeni a töltési sebességet, amely különösen az elektromos autók térhódítása miatt tekinthető kritikusnak, hiszen még egy belsőégésű motort használó autó megtankolása alig néhány percet vesz igénybe, addig egy elektromos autó akkumulátorának feltöltése több órát is igénybe vehet. Természetesen léteznek különböző gyorsöltési megoldások is azonban ezek alkalmazásához szükséges az akkumulátor megfelelő kialakítása, valamint nem megfelelő alkalmazásuk vagy az akkumulátor nem megfelelő állapota az akkumulátor károsodását idézheti elő. [1.,2.]

A cellák önmagukban azonban korlátozottak mind a feszültség mind pedig a kapacitás tekintetében, ezért az elektrokémiai cellák megfelelő kapcsolásával az adott célnak megfelelő akkumulátorokat hoznak létre, amelyek sorosan és párhuzamosan kötött cellákból épülnek fel. Az adott applikációnak megfelelően a cellák lehetnek csak sorosan, csak párhuzamosan, valamint kombináltan is kötve.

Sorosan kötött cellák esetében a feszültségek összeadódnak még az elektromos kapacitás értéke állandónak tekinthető, amennyiben a kötésben részt vevő cellák feszültsége és elektromos töltése azonos, ahogy az az 1. ábrán is látható.



3. ábra Sorosan kötött elektrokémiai cellák (saját ábra)

$$U = \sum_{j=1}^g U_j \quad (1)$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_g \quad (2)$$

Fontos kiemelni, hogy az elektromos töltés (Q) SI mértékegysége a coulomb (C), amely azonban definíciója alapján azonos az elektromos áramerősség és a másodpercben kifejezett idő szorzatával. Ez azért fontos mivel az akkumulátorban eltárolható töltésmennyiség értékét (az akkumulátor kapacitását) amperórában vagy miliamperórában szokás megadni.

$$1\text{ C} = 1\text{ As} = \frac{1}{3600}\text{ Ah} \quad (3)$$

Emellett fontos még az elektromos munkát (W) megemlíteni, amely megmutatja, hogy az adott teljesítményű berendezés, adott idejű működéséhez mekkora mértékű elektromos teljesítmény felhasználása szükséges. Az elektromos munkát éppen ezért az elektromos teljesítmény és az idő szorzataként számítjuk ki:

$$W [\text{kWh}] = P [\text{kW}] \cdot t [\text{h}] \quad (4)$$

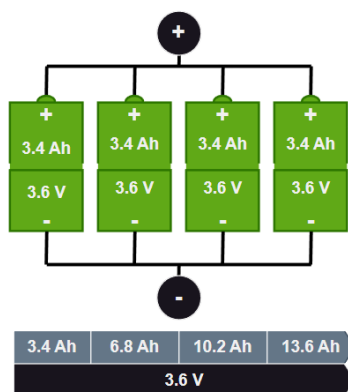
Azonban az akkumulátorok esetében célszerűbb mindezt az elektromos feszültségre és az elektromos töltésre visszavezetni:

$$W [\text{kWh}] = U [\text{V}] \cdot Q [\text{Ah}] \quad (5)$$

Az elektromos munkát azért fontos megemlíteni, mivel az akkumulátorok jellemzésénél gyakran alkalmazott térfogati energiát $\frac{\text{Wh}}{\text{L}}$ -ben még a fajlagos energiát $\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ -ban szokták megadni.

A sorosan kötött cellák esetében fontos továbbá kiemelni, hogy amennyiben valamelyik cella kevesebb feszültséget tud biztosítani, mint a többi úgy az akkumulátor hamarabb fogja elérni a lemerülési pontját, ami az elektromos feszültség összeomlásához és az eszköz kikapcsolódásához vezet. [1.,3.]

A **párhuzamosan kötött cellák** éppen ellentétesen viselkednek, mint a sorosan kötött cellák hiszen a párhuzamosan kötött cellák esetében az elektromos kapacitás értékek összeadódnak még a feszültség értéke állandó, ahogy az a 2. ábrán is látható.



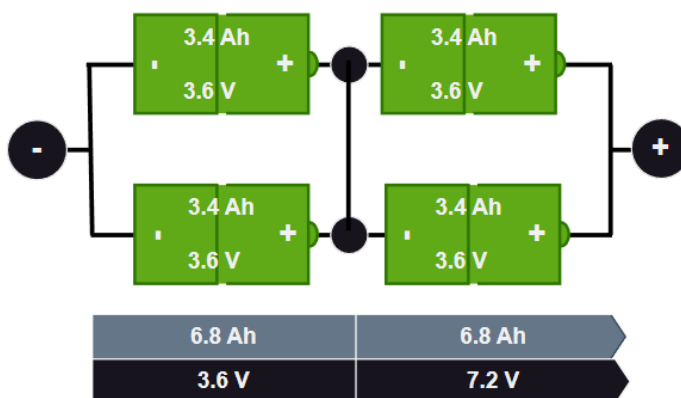
4. ábra Párhuzamosan kötött elektrokémiai cellák (saját ábra)

$$Q = \sum_{j=1}^g Q_j \quad (6)$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_g \quad (7)$$

A párhuzamosan kötött cellák esetében fontos kiemelni, hogy amennyiben valamelyik cella kevesebb elektromos kapacitást tud biztosítani az a feszültséget nem fogja befolyásolni, viszont a rendszer csak alacsonyabb futásidőt fog lehetővé tenni a csökkent kapacitás miatt. A párhuzamosan kötés esetében kevésbé kritikus, ha az alkalmazott celláknak nagyobb a belső ellenállása, viszont az esetleges rövidzárlatok jóval kritikusabbak. Ennek oka abban keresendő, hogy a zárlatos cella energiát von el a többi cellától, amely hő termelődéshez és tűzkockázathoz vezet. Éppen ezért a nagyobb akkumulátor csomagok olyan biztosítékokat tartalmaznak, amelyek képesek a már túlzottan gyenge cellákat leválasztani a rendszerről, ezáltal optimalizálva az akkumulátor teljesítményét és növelve annak biztonságosságát. [1.,3.]

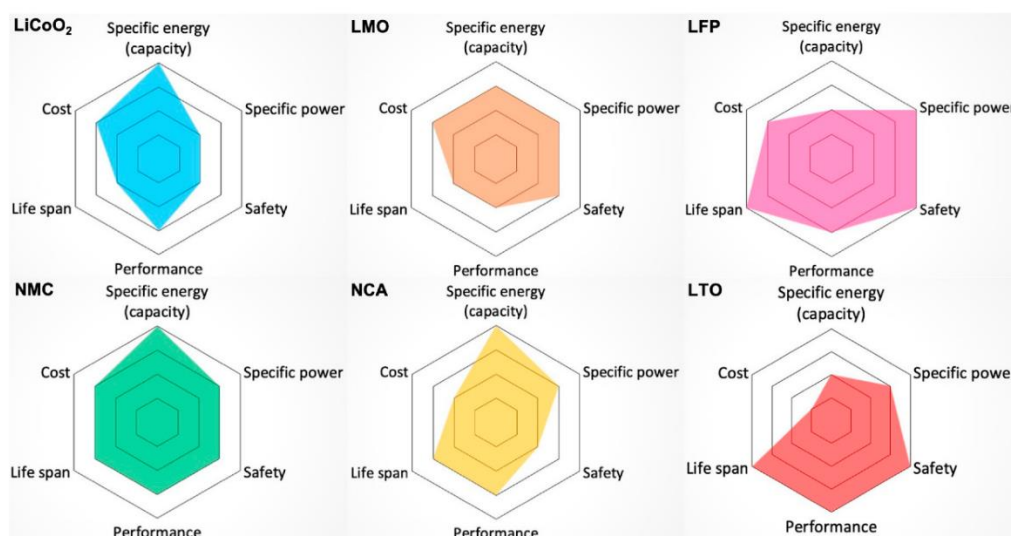
A **kombináltan kötött cellák** esetében az elektrokémiai cellákat sorosan és párhuzamosan is kötik, amely az akkumulátor tervezése során hatalmas rugalmasságot tesz lehetővé. Ebben az esetben a párhuzamosan kötött cellák elektromos kapacitásai, illetve a sorosan kötött cellák feszültségei összeadódnak, ahogy az a 3. ábrán is látható. A kombináltan kötött cellák fő hátránya, hogy a cellákat folyamatosan monitorozni kell, hogy azok a biztonságosnak tekinthető feszültség, illetve áramerősség tartományban vannak-e, ami különösen a nagyobb akkumulátor csomagok esetében bonyolult, egyedi tervezésű, áramkörök létrehozását igényli. Az ilyen jellegű kötések alkalmazása optimálisnak tekinthető például az elektromos autókban található akkumulátor csomagok esetében. Ennél a kötési megoldásnál fontos ügyelni arra, hogy hogyan határozzuk meg a sorosan és párhuzamosan kötött cellák számát. A Li-ion akkumulátorok esetében először a párhuzamosan kötött cellák számát határozzák meg majd ezeket kötik sorosan, ezzel is csökkentve az akkumulátor csomag védelmét biztosító feszültségszabályozás bonyolultságát. [1.,3.]



5. ábra Kombináltan kötött elektrokémiai cellák (saját ábra)

Mivel dolgozatom témája a Li-ion akkumulátorok ezért fontos kiemelni, hogy a Li-ion akkumulátor, valamint Li-ion cella kifejezésre inkább csak, mint gyűjtőnévre szabad tekintenünk, hiszen attól függően, hogy milyen elektródokat használunk nagy mértékben változik az, hogy az adott cella és a belőle készült akkumulátor milyen alapvető tulajdonságokkal rendelkezik, illetve, hogy milyen területeken alkalmazható [8.]. A következőkben a leggyakrabban használt Li-ion cella típusokat szeretném ismertetni. Elsőként érdemes megemlíteni az **LCO** vagy teljes nevén lítium-kobalt-oxid cellákat, amelynek anódjához grafitot katódjához pedig lítium-kobalt-oxidot használnak, ezt a konstrukciót magas fajlagos energia jellemzi, azonban élettartama, termikus stabilitása és terhelhetősége korlátozott, így elsődlegesen különböző hordozható eszközökhöz használják. Az **LMO** vagy lítium-mangán-oxid cellák esetében a katódhoz lítium-mangán-oxidot, az anódhoz pedig szintén grafitot használnak. Az LMO ugyan kisebb fajlagos energiával rendelkezik, mint az LCO azonban tervezési szempontból nagyobb rugalmasságot biztosít és jobb stabilitásának köszönhetően jóval biztonságosabb is. Az LMO használata azonban egyre inkább háttérbe szorul ugyanis a jobb teljesítmény elérése érdekében a mangán mellett még nikkelt és kobaltot is alkalmaznak, így létrehozva a lítium-nikkel-mangán-kobalt-oxidot, amely napjaink egyik legsikeresebb lítium-ion cellájának az úgynevezett **NMC**-nek szolgál a katódjaként [9.]. Ennek a cellának a fő előnyét az adja, hogy a mangánnak köszönhetően jó stabilitással még a nikkelnek köszönhetően magas fajlagos energiával rendelkezik. Ráadásul a nikkel-mangán-kobalt egymáshoz viszonyított aránya nem kötött és könnyen elegyíthetők egymással. Ennek köszönhetően egyrészt a drága és korlátozott mértékben elérhető kobalt mennyiségét folyamatosan csökkenteni lehet az NMC cellákba, amely nagy mértékben elősegíti a gazdaságos gyártást. Másrészt lehetővé teszi a széleskörű alkalmazását gépjárművekben és az iparban. A gépjárművekben történő alkalmazás szempontjából fontos megemlíteni az **NCA** cellát, amelyben lítium-nikkel-kobalt-alumínium-oxid katódot és grafit anódot használnak. Ez a cella sok hasonlóságot mutat az LCO cellával és fajlagos energiája kifejezetten magas, fő hátránya, hogy az NMC-hez képest kevésbé stabil és így kevésbé biztonságos. Érdemes még megemlíteni az lítium-titanát azaz **LTO** cellát, amely lítium-titanát anódat és LMO vagy NMC katódot tartalmaznak. Ennek előnye, hogy a cella széles hőmérséklettartományban használható, rendkívül stabilnak és biztonságosnak tekinthető, valamint élettartama többszöröse más Li-ion celláknak, azonban alacsony fajlagos energia és magas költség jellemzi, amely korlátozza alkalmazását. Végezetül meg kell említenem az **LFP** cellákat, amelyekben grafit anód és lítium-vas-foszfát katód található. Erre a cella típusra jellemző, hogy nagy áramerősség biztosítására képes, nagyon biztonságos és hosszú élettartammal rendelkezik, azonban alacsony fajlagos

energiával és a többi Li-ion cellához képest magas önkisüléssel rendelkezik. Az LFP cellákból készített Li-ion akkumulátorok lehetőséget kínálhatnak az ólomsav akkumulátorok jövőbeni leváltására. [7.] A 6. ábrán a korábban említett cellatípusok összehasonlítása látható.

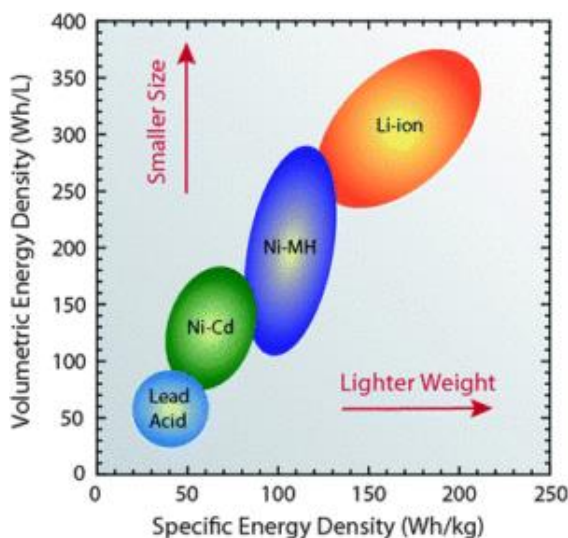


6. ábra Különböző elektromos gépjárművekben használt Li-ion cella típusok összehasonlítása [9.]

2.2. Előnyök és hátrányok

Mint minden egyes eszköznek, így a Li-ion akkumulátoroknak is számos előnye és hátránya van, amelyek közül először az **előnyöket** szeretném megemlíteni. Fontos kiemelni, hogy a Li-ion cellák **nagy fajlagos és térfogati energiával rendelkeznek** más másodlagos cellákhoz képest, amely kifejezetten optimálissá teszi alkalmazásukat az elektromos és hibrid járművek esetében [10.]. Ehhez a tulajdonságukhoz ráadásul **nagy energia tárolási kapacitás** és **alacsony belső ellenállás** is társul. Ezt előnyt tovább fokozza a Li-ion cellákra jellemző **jó Coulomb-hatékonyság**, amely annak arányát mutatja meg, hogy egy teljes ciklus alatt mennyi töltést lehet az adott cellából kivenni a beletöltött töltés mennyiségéhez viszonyítva. A Li-ion cellák **magasabb feszültséggel (3.6 V)** és **kedvezőbb terhelési karakterisztikával** rendelkeznek, mint más másodlagos elektrokémiai cellák. Az előbbi lehetővé teszi, hogy bizonyos applikációs megoldásoknál kevesebb cellát kelljen sorban kapcsolni adott feszültség eléréséhez, amely helytakarékosági és tömegoptimalizálási szempontból rendkívül fontosnak tekinthető. Utóbbi azért nevezhető fontos előnynek, mivel a Li-ion cellák használatuk során stabilan tudják a korábban már említett magasabb feszültség értéket tartani szinte a cella teljes kisütéséig. Másik nagy előnyük, hogy a Li-ion akkumulátorok rendkívül **sok töltési ciklust** bírnak ki és a megfelelő használati körülményekre ügyelve hosszú ideig **karbantartás mentesen** alkalmazhatók. Emellett relatíve **alacsony töltési idővel** rendelkeznek, amely az

akkumulátor és gyorsító technológia folyamatos fejlődésének köszönhetően a jövőben várhatóan tovább csökken. Egy további előny, hogy ahogy már az korábban is említve volt a Li-ion cella inkább gyűjtőnévként funkcionál és **több működőképes cella típus** is létezik, amely nagyfokú rugalmasságot tesz lehetővé mind a tervezés mind pedig az applikáció területén. Végezetül fontos megemlíteni, hogy a Li-ion cellák **önkisülése jóval kisebb**, mint más másodlagos celláké, amely mind tárolás, mind pedig használat szempontjából előnyösnek tekinthető. [3.,10.]



7. ábra Különböző akkumulátor típusok fajlagos- és térfogati energiája [10.]

Természetesen a Li-ion cellák és a belőlük készült akkumulátorok számos **hátránnyal** is rendelkeznek. Fontos megemlíteni, hogy **használatuk optimális hőmérséklettartománya rendkívül szűk** [10.]. A túl alacsony hőmérsékleten lassítja az egyes cellákban és az akkumulátorban lejátszódó kémiai folyamatokat, ami azt is jelenti, hogy 0 °C alatt a gyorsító már nem kivitelezhető. Miközben túl magas használati hőmérséklet esetén a Li-ion cellák hajlamosak a túlmelegedésre, amely egyrészt hozzájárul az akkumulátor élettartamát csökkentő degradáció fokozódásához másrészt extrém esetekben a túlmelegedés akár a cella visszafordíthatatlan károsodásához, sőt öngyulladásához is vezethet, ami jelentős anyagi károk keletkezéséhez vezethet. Ezen hátrány mérséklésére különböző temperálási megoldásokat, valamint úgynevezett akkumulátor menedzsment rendszereket alkalmaznak. További hátrányként említhető a Li-ion akkumulátorok esetében a biztonságosság problémája ugyanis ezek az akkumulátorok más másodlagos akkumulátorokhoz képest **kevésbé robusztusok**, ami szükségessé teszi különböző védőáramkörök és akkumulátor menedzsment rendszerek (BMS) alkalmazását, amelyek biztosítják, hogy az eszköz az optimális tartományokon belül üzemeljen. Fontos kiemelni, hogy a Li-ion **akkumulátorok kapacitása folyamatosan csökken**. Ennek

egyik oka az akkumulátorok **öregedése** még másik oka a főleg használati szokásokra visszavezethető folyamatos **degradáció**, amely nagy mértékben befolyásolhatja az akkumulátor kapacitását és élettartalmát amennyiben az akkumulátor használata nem az optimális keretek között történik. Ezen kívül érdemes megemlíteni, hogy a Li-ion akkumulátorok alkalmazása jóval **költségesebbnek** tekinthető, mint más akkumulátor típusok alkalmazása, ami nagy mértékben korlátozza ezen akkumulátorok gyors elterjedését. Ráadásul egy **fejlődő technológiát** képviselnek, ami azért tekinthető hátránynak mivel a technológia nem tekinthető állandónak és a folyamatos fejlesztések következtében az egyes megoldások gyorsan idejétmúlttá válhatnak. További hátránként említhető, hogy **szállításuk szigorúan szabályozott** ezen szabályozások megfelelő betartása pedig egyrészt nagy mértékben bonyolítja szállításukat másrészt pedig költségesebbé is teszi azt. [10.,11] Ezen szabályozásokból az Európán belül, illetve nemzetközileg alkalmazott szabályozásokat szemlélteti a 8. ábra.

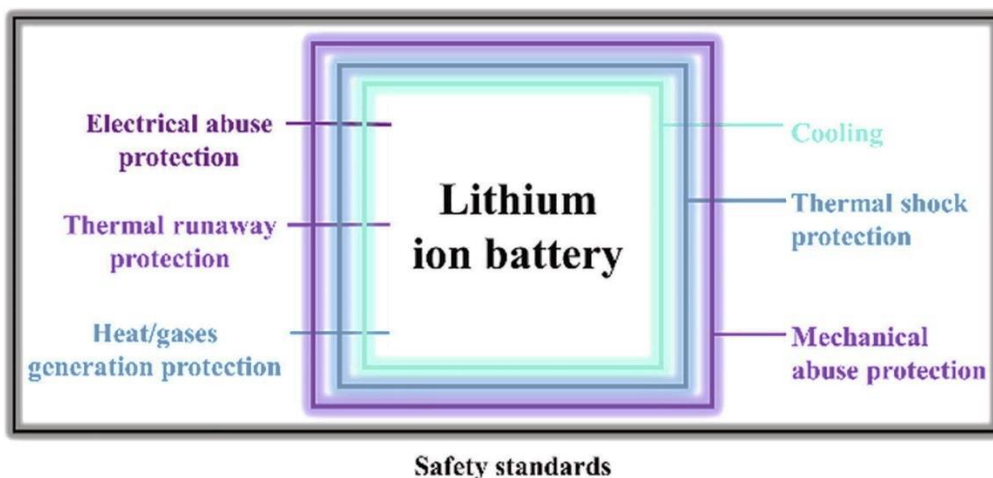


8. ábra A Li-ion cellák és akkumulátorok szállítására vonatkozó európai és nemzetközi szabályozások [11.]

2.3. Biztonsági szempontok

Az Li-ion cellák és belőlük készített akkumulátorok esetében számos biztonsági szempontot kell figyelembe venni, amelyekből a két legfontosabbat szeretném ebben a pontban kiemelni. Az első és legfontosabb biztonsági szempont a **cellák stabilitása**, amely minden más szempontot felülíró biztonsági tényező. Ez egyrészt magában foglalja azt, hogy csak olyan elektród kombinációval ellátott Li-ion cellák kerülnek forgalomba, amelyek hosszútávú biztonságos működése garantáltnak tekinthető még akkor is, ha más konfigurációk magasabb fajlagos energiát és így kisebb tömeget jelentenének másrészt a cellák belső szerkezete úgy kerül kialakításra, hogy a cella működése során biztosan lejátszódó folyamatok ellen védelmet

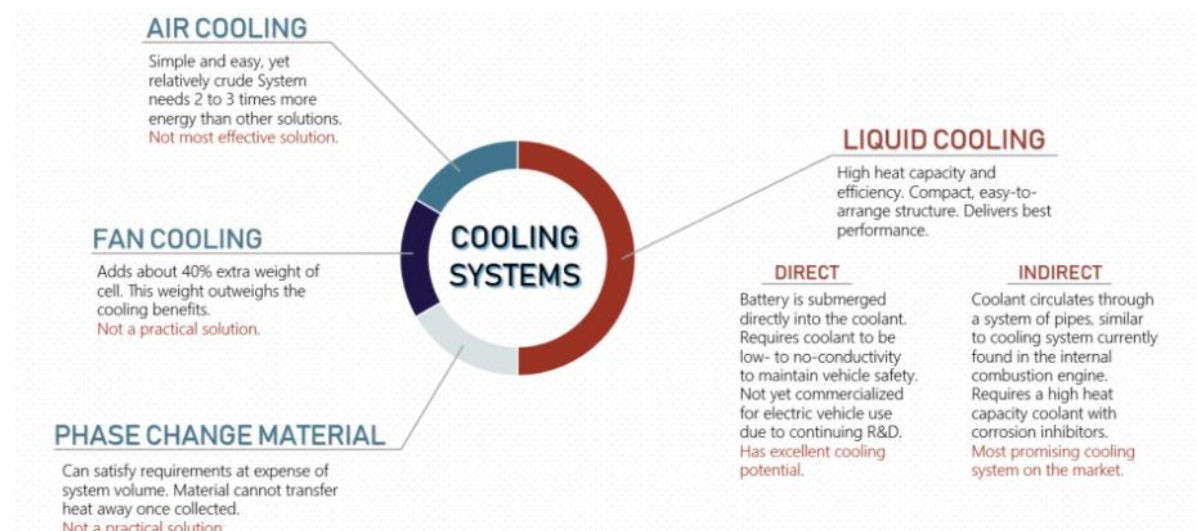
nyújtson, amely védelmi megoldásokra egy jó példája a szeparátor. Emellett természetesen számos egyéb biztonsági megoldás kerül alkalmazásra a Li-ion cellák és akkumulátorok esetében, amelyeket a 9. ábra hivatott összefoglalni. [12.]



9. ábra Li-ion akkumulátorokban alkalmazott biztonsági megoldások [12.]

A másik fontos biztonsági szempont a **cellák és az akkumulátor optimális működési tartományainak** biztosítása, amelyet számos különböző megoldás együttes alkalmazásával biztosítanak. Az **akkumulátor menedzsment rendszer** (BMS) felel azért, hogy az akkumulátor különböző paraméterei mindig az optimális működési tartományokon belül mozogjanak [3.]. Ezt egyrészt különböző biztonsági áramkörökkel másrészt különböző hőmérsékletszabályozó rendszerekkel érik el. Ami a **biztonsági áramköröket** illeti az akkumulátor számára védelmet kell biztosítaniuk például a túlzott kisütés, a túl magas töltési áramerősség vagy éppen a keletkező rövidzárlatok ellen, emellett meg kell akadályozniuk a túlzott cella nyomás vagy gázképződés kialakulását is. A biztonsági áramkörök feladata továbbá az egyes cellák vagy éppen akkumulátorok közötti kiegyenlítési feladatok ellátása, valamint a cellák degradációjával és öregedésével az egyes cellák rendszerből történő kiiktatása is. A **megfelelő hőmérsékletszabályozás** tekinthető a BMS másik fontos biztonsági feladatának, hiszen a Li-ion akkumulátorok optimális működési hőmérséklete rendkívül szűk tartományban mozog, így hőmérséklet tekinthető a legkritikusabb tényezőnek az optimális élettartam szempontjából. Mind az akkumulátorok hűtésére mind pedig azok fűtésére számos különböző úgynevezett temperálási megoldást alkalmaznak. Ezek közül először az akkumulátorok hűtéséről szeretnék néhány szót ejteni, mivel a cellák túlmelegedése tekinthető gyakoribb problémának. A hűtéshez használhatunk úgynevezett **fázisváltó anyagokat (PCM)**. Ezen anyagok nagy mennyiségű hő felvételére képesek minimális hőmérséklet növekedés mellett miközben szilárd fázisból folyékony fázisúvá alakulnak. Azonban a PCM-ek csak

elméleti szinten alkalmasak arra, hogy az akkumulátorok hűtési rendszerének részét képezzék, mivel autóiipari alkalmazásukat két komoly tényező is akadályozza. Egyrészt a fázisváltozás közben térfogatuk is megváltozik, másrészt a PCM-ek csak a képződő hő elnyelésére alkalmasak annak elvezetésére nem. A **hűtőbordák** alkalmazásával megnövelhető a felület és ezáltal a hővezetés mértéke. A hűtőbordák nagyon jó hővezető képességgel rendelkeznek és így alkalmasak a hűtési célok elérésére, azonban a bordák jelentette extra tömeg sokkal nagyobb, mint a hűtés jelentette előny, így alkalmazásuk nem tekinthető optimális megoldásnak. A megfelelő hűtési teljesítmény biztosítása megközelítőleg 40%-os tömegnövekedést eredményezne a cellákon. A **levegő hűtés** az akkumulátorok hűtésének legegyszerűbb, de nem túl hatékony megoldása [13.]. Ennek lényege, hogy az akkumulátor csomag körül áramló levegő képes felvenni a cellák által kibocsátott hőt és elszállítani azt ezzel hűtve az akkumulátort. Azonban az elektromos járművek egyre széleskörűbb terjedésével a levegő hűtés alkalmazása komoly biztonsági kockázatokat vetett fel különösen a forró klímájú területeken. Az adott átlaghőmérséklet fenntartásához 2-3-szor annyi energiát igényel, mint a folyadékos hűtés vagy a hűtőbordák alkalmazása. A **folyadék hűtés** alkalmazása tekinthető a jelenlegi leoptimálisabb hűtési megoldásnak, mivel nagyobb a hővezető képessége és hőkapacitása, mint a levegőnek, ezért kiemelkedő a teljesítménye. Emellett előnye a kompakt felépítés és az egyszerű elrendezés is, valamint az, hogy ez a megoldás képes a leginkább adott hőmérsékleti tartományon belül tartani az akkumulátort. Természetesen ennek a megoldásnak is vannak biztonságtechnikai kockázatai, mint például a szivárgás és az ártalmatlanítás nehézsége. A folyadék hűtésen belül megkülönböztetünk **direkt** és **indirekt** rendszereket. Ezeknél ahogy az a nevékből is adódik a fő eltérést az jelenti, hogy az egyik direkt a másik pedig közvetett kapcsolatban áll a hűteni kívánt akkumulátor cellákkal, emellett a hűtéshez használt folyadék is eltérő hiszen a direkt folyadék hűtés esetében a folyadék nem rendelkezhet elektromos vezetési képességgel. Jelenleg elmondható, hogy a direkt folyadék hűtési rendszerek esetében rendkívül fontos egy a célnak megfelelő, biztonságos folyadék kifejlesztése. [3.,13.]



10. ábra Különböző hűtési megoldások [13.]

Előfordulhatnak olyan helyzetek is, amikor a cellákat nem hűtenünk, hanem fűtenünk kell. Erre szintén megoldást jelenthetnek a **fázisváltó anyagok (PCM)**, amelyek akár passzív fűtésre is alkalmazhatók, hiszen nagy mennyiségű hő felszabadítására képesek miközben újra megszilárdulnak. Ennek főleg akkor van nagy jelentősége, amikor az akkumulátor üzemi hőmérséklete nagy mértékben meghaladja a környezet hőmérsékletét, mivel ebben az esetben a PCM alkalmazása megvédeni az akkumulátort a hirtelen hűlés okozta károsodásoktól. Ezen kívül alkalmazhatunk különböző **áramlásos fűtési rendszereket is**. A **levegő alapú fűtési rendszerek** esetében ellenállásfűtést, valamint ventilátorokat használnak. Ezzel a megoldással elektromos energiát alakítanak át hővé majd a ventilátorok segítségével biztosítják a megfelelő hőcserét a levegő és az akkumulátor között. A megvalósítás zárt rendszerben történik és a levegő a cellák oldalsó felületei, illetve az akkumulátor csomagolás falai között áramlik. A levegő áramlása a tervezéstől függően lehet lamináris és turbulens annak függvényében, hogy mekkora a tömegáram és az akkumulátor csomag. Lehetőség szerint a tervezésnél a turbulens áramlás kialakulására kell törekedni, mivel az hatékonyabb, mint a lamináris áramlás. A **folyadék alapú fűtésrendszerek** hatékonyabbak és jobb hővezetési tulajdonsággal rendelkeznek, mint a levegős megoldások, amelynek köszönhetően kisebb a hőmérséklet eltérés a rendszeren belül. A témában végzett szimulációk és tanulmányok rendre azt mutatták ki, hogy a fűtési megoldások közül a folyadék alapúnál a legegységesebb a hőmérséklet eloszlása, habár maga a megvalósítás kicsit bonyolult. Fontos kiemelni, hogy a folyadék alapú fűtési rendszerek esetében a hatékonyságot a Reynolds szám nem befolyásolja jelentősen. Természetesen számos más hűtési- és fűtési megoldás is létezik az akkumulátorok optimális működési hőmérsékletének biztosítására, amelyekből dolgozatomban jellegéből adódóan csak néhányat mutattam be. [13.]

2.4. Gépjárművekben történő alkalmazás

Mint az közismert a gépjárműgyártás területen egyre nagyobb hangsúly kapnak a villanymotorral rendelkező gépjárművek és így a működésükhöz nélkülözhetetlen Li-ion akkumulátor csomagok is. Ebben a pontban ezért a Li-ion cellák és a belőlük készült akkumulátorok gépjárművek esetében történő általános alkalmazásának előnyeiről és korlátairól szeretnék beszélni, illetve célom rámutatni arra, hogy a belsőégésű motoros és villanymotoros gépjárművek körüli vitában nem minden fekete és fehér. Természetes az elektromos gépjárműveknek számos előnye van úgy, mint a **villanymotorok magas hatásfoka**, hiszen még a belsőégésű motorok esetében a hatásfok átlagosan 40% körülinek tekinthető a különböző veszteségek miatt addig ez az érték villanymotorok esetében 80% körül mozog [14.]. További előnyük, hogy az akkumulátorokból vételezett **villamosenergia számos forrásból** származhat ezzel szemben a belsőégésű motorok fosszilis energiaforrást használnak. Egy másik előnyük, hogy még a belsőégésű motoros autók esetében a fékezés során használt energia teljes mértékben elviszik, addig az elektromos autók a fékezési energia egy részét képesek arra használni, hogy az akkumulátort töltsék ezáltal valamennyi energiát visszanyerve. Fontos megemlíteni, hogy a villanymotorok **képesek azonnal a maximális nyomatékot biztosítani** még a belsőégésű motoroknál a maximális nyomaték felépítéséhez bizonyos mennyiségű idő és sebesség szükséges. Végezetül az elektromos autók esetében a **karbantartási és üzemeltetési költségek** általában véve alacsonyabbak, mint a belsőégésű motort használó autók esetében [15.].

Ami a **korlátokat** illeti a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően ugyan egyre magasabb fajlagos energiájú Li-ion cellák érhetők el azonban ezek **energia sűrűsége** még mindig jóval kisebb, mint a belsőégésű motorokban használt üzemanyagoké vagy a Li-ion alapú elsődleges elektrokémiai celláké. Ugyan léteznek olyan másodlagos Li-ion cella konfigurációk, amelyek a kereskedelmi forgalomban elérhető celláknál jóval magasabb fajlagos energiával rendelkeznek azonban ezek általános használata más tényezők miatt nem megoldható. További korlátozó tényezőként említhető az elektromos autók esetén jelentkező extra **tömeg**, amely egyrészt a biztonsági szempontokra másrészt a nagyobb hatótáv biztosítására vezethető vissza hiszen az elektromos gépjárművek hatótávolságának növelését nagyobb és erősebb akkumulátor csomagokkal igyekeznek megoldani, amelyek minden esetben megfelelő biztonsági rendszereket is igényelnek [14.]. Ez a tendencia azonban nem csak a tömeget, hanem az akkumulátor csomagok **helyigényét** is nagyban növeli. Végezetül fontos megemlíteni, hogy az elektromos gépjárművek **hatótávolsága** az esetek többségében alulmarad a belsőégésű

motort használó gépjárművekével szemben, amelyen a sok esetben elégtelen **töltő hálózat** és a sokkal hosszabb **töltési idő** sem segít [15.].

Vannak olyan tényezők, amelyeket nem lehet egyértelműen sem előnyként, sem pedig korlátozó tényezőként megemlíteni ezek közül az egyik a **károsanyagkibocsátás**. Sokszor hallhatjuk, hogy az elektromos gépjárművek zéró károsanyagkibocsátással rendelkeznek, ami azonban inkább csak részigazságnak mondható. Az ugyanis tény, hogy az elektromos autók nem rendelkeznek úgynevezett kipufogógáz-kibocsátással, azonban a villamoshajtásrendszer által az akkumulátorból vételezett energia csak ritkán származik teljesen megújuló forrásból, azaz a károsanyag kibocsátása ugyanúgy megtörténik csak helyben és időben máskor. Így az elektromos gépjárművek zéró károsanyagkibocsátása csak akkor tekinthető majd teljesen igaznak és ténylegesen előnynek, amikor az általuk felhasznált energia előállítása is károsanyagkibocsátás nélkül történik. A másik ilyen tényező pedig a gépjárművek **akusztikája**. Hiszen még a villanymotorokat alapvetően a halk üzemelés jellemzi, addig a belsőégésű motorral rendelkező járműveknek a motor teljesítményétől függően változó, de minden esetben jellegzetes hangja van. Ez a tényező azért tekinthető semlegesnek mert bizonyos emberek előnyként élik meg az autó halk üzemelését még mások hatalmas hátrányként tekintenek a motor hangjának hiányára [14.,15.].

2.5. Használatuk más területeken

Természetesen a Li-ion cellákat és akkumulátorokat nem csak gépjárművekben használják, így a következőkben az egyéb applikáció területekből szeretnék néhányról szót ejteni. Az első és talán annyira nem is meglepő alkalmazási területüket a **hordozható és újratölthető elektromos eszközök** jelentik, mint például a mobiltelefonok vagy éppen a laptopok, amelyeknél fontos, hogy az eszközök méretéből adódóan egy kisméretű, nagy fajlagos energiájú, de mindenekelőtt stabil és biztonságos energiaforrás kerüljön beépítésre. Egy másik alkalmazási területként tekinthetünk a különböző **elektromos kéziszerszámokra és orvosi eszközökre**, melyeknél a fő előnyt szintén a nagyobb fajlagos energiához társuló kisebb tömeg és méret jelenti, amely lehetővé teszi kisebb és ergonomikusabb eszközök tervezését. A különböző **riasztórendszerek** is nagy hasznát veszik a Li-ion akkumulátoroknak, hiszen ezen eszközök sokszor a hálózathoz csak nehezen csatlakoztatható helyen helyezkednek. A riasztórendszerek esetében a korábban már említett előnyök mellett fontos kiemelni a Li-ion akkumulátorok alacsony önkisülését, amely nagyban megnöveli várható élettartamukat főleg, ha a riasztórendszer csak időszakosan van használva. Végezetül még szeretném megemlíteni a **napelemes rendszereket**, mint a Li-ion akkumulátorok újabb felhasználási területét hiszen

egyrészt ezek az akkumulátorok remekül alkalmazhatók a napelemek által termelt többlet energia hosszabb távú elraktározására. Másrészt pedig a napelemek által biztosított töltés jellege tökéletesen passzol a Li-ion akkumulátorokhoz, amelyekben a nem megfelelő töltés könnyedén degradációt vagy súlyos esetben termikus kifutást idézhet elő. A 11. ábrán néhány példa látható arra, hogy a gépjárműveken kívül hol kerülnek a Li-ion akkumulátorok felhasználásra [16.]



11. ábra Li-ion akkumulátor felhasználási területei [16.]

2.6. Potenciális fejlődésük

Mint ahogy az már korábban is említésre került a Li-ion akkumulátorokhoz köthető technológiák egy rendkívül intenzíven és dinamikusan fejlődő tudományterületnek tekinthetők. Általánosan elmondható, hogy a különböző fejlesztési irányzatok célja a jelenleginél magasabb fajlagos energia elérése a jelenleg általánosan használt Li-ion cella típusok újragondolásával, amely a gyakorlatban azt jelenti, hogy az anód, a katód, az elektrolit vagy ezek valamilyen kombinációja kerül kicserélésre a magasabb fajlagos energia elérése céljából. Ezen törekvések egyik fontos példája a **lítium fém anódként** történő alkalmazása, amely jóval nagyobb fajlagos energiát tenne lehetővé, azonban a folyamat során lejátszódó lítium-dendrit képződés következtében a szeparátor könnyedén átszakadhat, amely rövidzárlathoz és akár termikus kifutáshoz vezethet. Ennek következtében a lítium fém anód kereskedelmi akkumulátorokban történő alkalmazása a nem megfelelő stabilitás és a tűzveszélyesség miatt nem biztonságos és megoldható. A dendrit képződési probléma megoldását követően azonban komoly potenciál

lehet ebben a technológiában. Egy másik ígéretes irányzatot jelenthet a **szilikon anódok** használata, amely a jelenleg használt grafit anódok rendkívül erős alternatívája lehet a jövőben [17.]. Ez annak lenne köszönhető, hogy ezek a szilikon-karbon nanokompozit anyagok elméletileg azonos tömeg esetén akár tízszer annyi energia tárolására is képesek lehetnek, mint a grafit anódok. Azonban a töltés és kisütés során fellépő tágulások és zsugorodások strukturális problémákat idéznek elő, amely mind a stabilitást mind pedig az élettartamot nagy mértékben befolyásolja. Gondolhatnánk, hogy egy **szilikon-grafit anód** esetleg megoldást jelenthetne, amely részben igaz is, ugyanis az ilyen anódok a hagyományos grafit anódokénál elméletileg ötször nagyobb mennyiségű energia tárolására alkalmasak és még stabilok is, de a magas feszültségen történő alkalmazás közben fellépő strukturális problémák jelentősen csökkentik az akkumulátor élettartamát. Végezetül szeretném megemlíteni a **szilárdtest lítium akkumulátorokat**, amelyekben grafit anód helyett tiszta **lítium anódot**, folyékony elektrolit helyett pedig valamilyen **szilárd polimert** vagy **kerámia szeparátort** használnak. Ennél az akkumulátor típusnál, azonban hasonló problémák jelentkeznek, mint a lítium fém anódot használó akkumulátoroknál ráadásul az alacsony hőmérsékleten történő megfelelő vezetőképesség és az alacsony töltési ciklusszám is komoly kihívásokat jelent. Mint látható a modern akkumulátor technológia számos komoly kihívással néz szemben, melyek bármelyikének megoldása nagy mértékben elősegítheti a Li-ion akkumulátorok és az elektromos gépjárművek térhódítását. [18.]

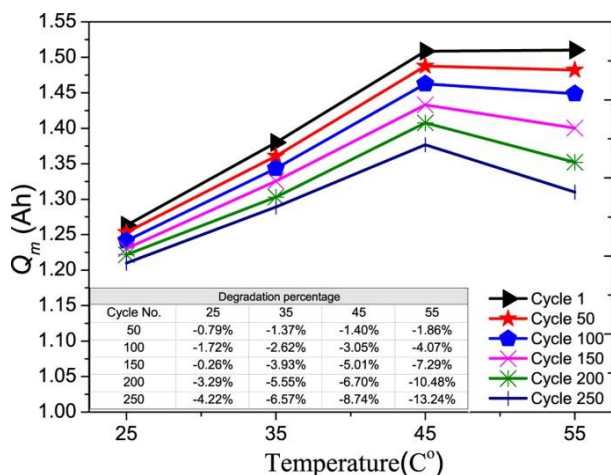
3. LI-ION AKKUMULÁTOROK ÉLETTARTAMÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK BEMUTATÁSA

Ahogy az már korábban is említésre került a Li-ion cellák és a belőlük készült akkumulátorok kifejezetten érzékeny eszközöknek tekinthetők, amelyek optimális élettartamát számos különböző tényező befolyásolja, amelyekről a következőkben szeretnék beszélni.

3.1. Hőmérséklet (Temperature)

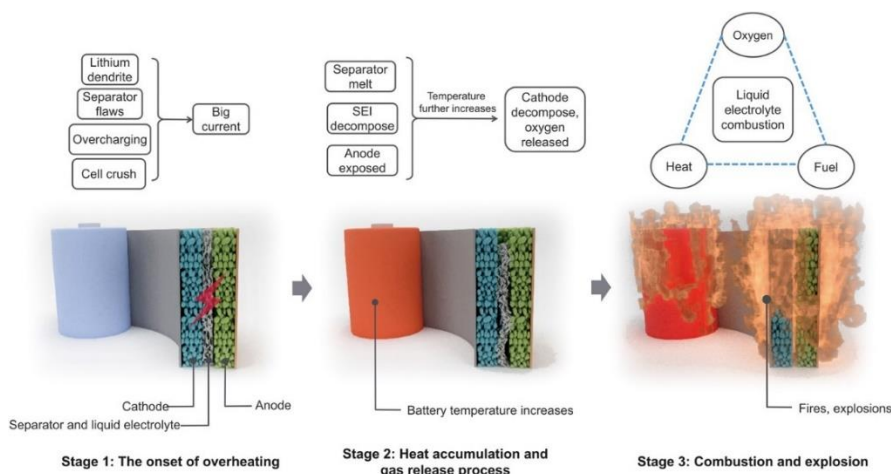
A Li-ion akkumulátorok csak egy rendkívül szűk hőmérséklet tartományban működnek optimálisan, amelynek elérését számos különböző úgynevezett temperálási megoldással biztosítják az akkumulátor tervezése és rendszerbe történő integrálása során. Fontos kiemelni, hogy az optimálishoz képest túl alacsony, illetve túl magas hőmérséklet eltérő hatást gyakorol a cellákra. Az optimálisnál magasabb hőmérséklet számos módon befolyásolja a Li-ion cellákat. A töltés során alkalmazott magas hőmérséklettel ideiglenesen növelhető az akkumulátor kapacitása. Ez hosszútávon azonban nagyobb kárt és problémát jelent, mint a

rövidtávon előidézett pozitív hatása ugyanis a túl magas hőmérséklet következtében a cella számos komponense károsodik, amely az egész rendszerre kihatással van. Felgyorsulnak a cellában lejátszódó degradációs folyamatok, amelyek a cella idő előtti elöregedését idézik elő, így mindenképpen figyelni kell az optimális töltési hőmérsékletre is. A túl magas töltési hőmérséklet degradációs hatását az ábra is jól szemléltet [19.].



12. ábra Maximális töltéstárolási kapacitás a hőmérséklet függvényében különböző töltési ciklusszámok esetében [19.]

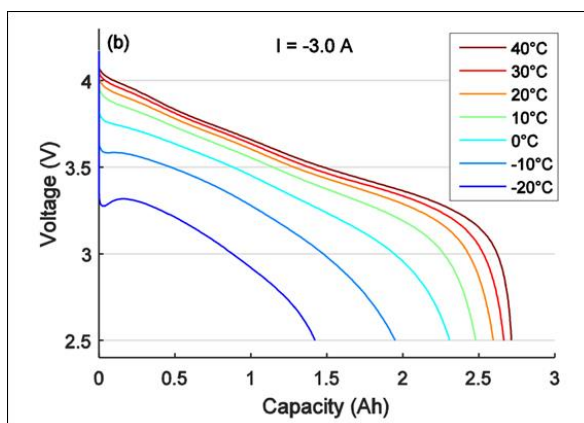
Az optimálisnál magasabb hőmérséklet a cella használata során is elkerülendő ugyanis ez károsítja a cella komponenseit, csökkenti a teljesítményt és visszafordíthatatlan károkat okozhat. Emellett a túl magas üzemi hőmérséklet fölösleges feszültséget idéz elő a cellában és szélsőséges esetekben az ábrán is látható termikus kifutásként ismert láncreakciót is előidézheti, így a túl magas üzemi hőmérséklet komoly anyagi- és biztonsági kockázatot jelent.



13. ábra A termikus kifutás és az azt megelőző fázisok [20.]

Ahogy az korábban már említésre került a túl alacsony hőmérséklet is hatással van a Li-ion cellákra. A hőmérséklet csökkenésével ugyanis **nő a cellák belső ellenállása**, amely töltés

esetén jelentős **töltési idő növekedést** eredményez ugyanis alacsony hőmérsékleten a cellákat csak rendkívül alacsony áramerősséggel lehet tölteni ráadásul bizonyos töltők gátolják is egy adott hőmérséklet alatti töltést. A nulla fok alatti töltés különösen veszélyes ugyanis ennek során **lítium fém bevonat keletkezik** az anódon, amely azonnali teljesítmény és biztonságosság csökkenést eredményez ráadásul a cellák érzékenyebbek lesznek a különböző behatásokra, mint például a vibráció vagy a különböző feszültségek. Az alacsony hőmérsékleten történő használat során is problémák jelentkezhetnek ugyanis különböző veszteségek lépnek fel a rendszerben, amiktől drasztikusan csökkenhet az elérhető teljesítmény. Emellett az alacsony hőmérséklet negatív hatással van a cellákban lejátszódó elektrokémia folyamatok sebességére is, amelyeket lassít, így csökkentve a cellák kapacitását. Ezekből következik, hogy az elektromos gépjárművek hatótávolsága alacsony hőmérsékleten kevesebb, mint normál körülmények között. [19.,20.]



14. ábra Egy 18650-ás Li-ion cella kisütési feszültségei 3A-n különböző hőmérsékletek esetén [21.]

3.2. Töltöttségi állapot (State of charge [SoC])

Az SoC a Li-ion cellák rendkívül fontos jellemzője, hiszen ez mutatja meg, hogy még mennyi rendelkezésreálló energia van az adott cellában a cella teljes kapacitásához viszonyítva.

$$SoC [\%] = \frac{\text{Cellában rendelkezésreálló energia}}{\text{Cella teljes kapacitása}} \cdot 100\% = \frac{Q(t)}{Q_n} \cdot 100\% \quad (8)$$

Azonban fontos kiemelni, hogy a cellában rendelkezésre álló energia számos egyéb tényezőtől is függhet, mint például az öregedéstől vagy éppen a használati hőmérséklettől [22.]. Éppen ezért beszélhetünk relatív töltöttségi állapotról (RSoC) és abszolút töltöttségi állapotról (ASoC) is. Az abszolút töltöttségi állapot egy referencia számként tekinthető ugyanis ennek számításához a cella névleges kapacitását veszik figyelembe, így értéke csak egy teljesen új cella esetében érheti el a 100%-ot egy bármely mértékben öregedett cellánál értéke sosem lesz

100% még akkor sem, ha a cella teljesen fel van töltve [23.]. Ezzel szemben a relatív töltöttségi állapot esetében a cella tényleges maximális kapacitását veszik figyelembe, amely azért lehet megtévesztő mert egy már előregedett cella esetében is elérheti értéke a 100%-ot, ami téves biztonságérzetet kelt. Amennyiben nincs külön kiemelve úgy az RSoC felel meg az SoC-nek. Fontos kiemelni, hogy az optimális élettartam eléréséhez érdemes az SoC értékét a 20% - 85% közötti tartományban tartani, ami azt is jelenti, hogy a cellában valamekkora mélységű kisütést mindig hagyni kell, azaz egy optimálisan használt cella esetében minden körülmény között jelen van egy 0%-nál nagyobb SoC és DoD. A következőkben néhány összefüggést szeretnék bemutatni az SoC és a DoD között:

$$SoC = 100\% - DoD \quad (9)$$

$$DoD = 100\% - SoC \quad (10)$$

$$100\% = DoD + SoC \quad (11)$$

Az akkumulátor rendszeres teljes feltöltése, azaz az SoC értékének 100%-ra való növelése szintén élettartam befolyásoló tényező ugyanis ezzel egyrészt fölösleges stresszt okozunk az akkumulátorban, valamint fokozzuk a dendrit képződést ezzel hozzájárulva az akkumulátor degradációjához. Éppen ezért különösen ügyelni kell arra, hogy az akkumulátor töltöttségét az optimális tartományon belül tartsuk. [24.,25.]

3.3. Kisütés mélysége (Depth of discharge [DoD])

Ahogy az már korábban említésre került az SoC és a DoD között kapcsolat van. Azonban rendkívül fontos megértenünk a DoD működését is, hiszen ez mutatja meg, hogy már mennyi energiát vettünk ki a cellánkból a cella teljes kapacitásához viszonyítva.

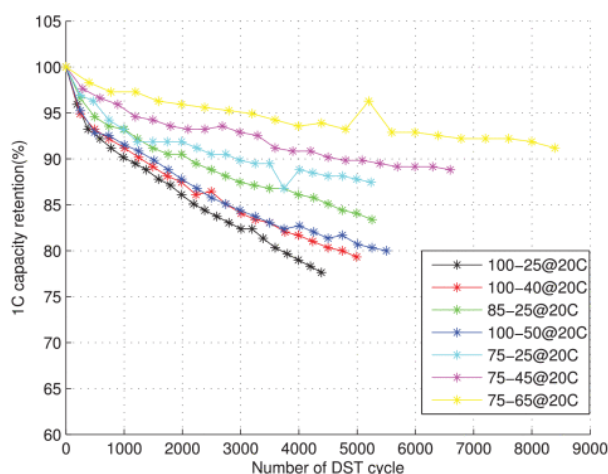
$$DoD [\%] = \frac{\text{Cellából kivett energia}}{\text{Cella teljes kapacitása}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Gondolhatnánk, hogy az a legoptimálisabb, ha a cellába raktározott energia minél nagyobb részét felhasználjuk, azonban ez nem feltétlenül igaz, sőt a cella élettartama szempontjából egy bizonyos mérték felett ez rendkívül káros használati szokás lenne. Fontos kiemelni, hogy a cellának sem a túl mély sem pedig a túl alacsony mértékű kisütés mélység nem kedvező [26.]. **A túl mély kisütés** rövidíti a cella élettartamát, mivel a túl mély kisütés során a cellában több feszültség keletkezik, mint a megfelelő használat során. Emellett pedig a cella hatásfokát is csökkenti ugyanis túl mély kisütés során nagyobb mennyiségű energia alakul át hővé. Azonban a **túl alacsony mértékű kisütés** sem tekinthető optimálisnak, hiszen ezzel jelentősen csökkentjük a cella használati idejét miközben növeljük a töltési ciklusszámát, amely

hosszútávon szintén a cella idő előtti elöregedéséhez vezethet. Összeségében elmondható, hogy az optimális DoD maximális értéke 75-80% azaz minimum 20-25%-os SoC értéket javasolt a cellában tartanunk, hogy elérjük az optimális élettartamot [27].

3.4. Különböző használati tartományok

Ahogy az már az SoC és DoD bemutatásánál is elhangzott rendkívül fontos az élettartam szempontjából, hogy ezt a két értéket optimális tartományon belül tartsuk. Számos tanulmányban foglalkoztak a különböző használati tartományok hatásával és minden esetben közel azonos eredmények születtek [28.]. A túl mély DoD-k és túl magas SoC-k minden esetben kerülendőek voltak, emellett az is kimutatásra került, hogy élettartam szempontjából a legkeskenyebb használati sávszéleségek tekinthetők a legoptimálisabbnak, azonban ezek bizonyos mérték fölött már a használhatóság rovására mentek. Hiszen ahogy az az ábrán is látható a sárgával jelölt 75%-65% közötti SoC érték tartásával lehetne a leghosszabb élettartamot elérni, azonban ez a mindössze 10%-os használati tartomány jelentősen korlátozná a cellák használatát [29.]. Ebből kifolyólag az ábrán zölddel jelölt 85%-25%-os vagy pedig a világoskékkel jelölt 75%-25%-os SoC tartomány tekinthető optimálisnak, mivel ezek mérsékelt kapacitás veszteséssel mellett nyújtanak egy kellően széles használati tartományt, amely lehetővé teszi a cellák hosszabb ideig tartó terhelését. [30.]



15. ábra Különböző SoC-DoD kombinációk hatása a kapacitásra [29.]

3.5. C-arány

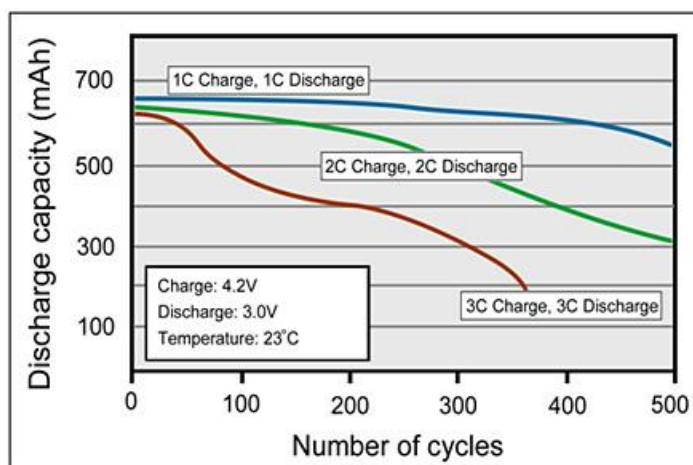
Az úgynevezett C-arány megmutatja az akkumulátor feltöltésének vagy kisütésének sebességét. Kiszámításához az akkumulátor töltéséhez/kisütés használt áramerősséget és az akkumulátor névleges kapacitását használják fel. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy amennyiben egy akkumulátort 1C-vel merítünk akkor a teljes kisütésig 1 órára van szükségünk.

Fontos kiemelni, hogy a gyors kisütésnél fellépő veszteségek csökkentik a kisütési időt és ugyanezen veszteségek növelik a töltési időt is. Néhány nagy teljesítményű akkumulátor képes elviselni az 1C-nél nagyobb töltést mérsékelt stressz fellépése mellett, azonban alapvetően törekedni kell az 1C-nél alacsonyabb értékekre az optimális élettartam eléréséhez éppen ezért a Li-ion cellákat olyan biztonsági áramkörrel látják el, amely gátolja az 1C-nél nagyobb kisütést.

A C-arány összefüggése:

$$Cr = \frac{i}{Q_n} \quad (13)$$

Felgyorsult világunkban a töltési időnek szerepe rendkívül kritikus hiszen ez nagy mértékben meghatározza az elektromos gépjárművek használhatóságát. Éppen ezért jelentős szerep jut a gyors- és ultragyorstöltőknek, amelyek nagyban rövidítik a töltési időt. Azonban a cella designja határozza meg, hogy mekkora az a töltési áramerősség, amelyet még károsodás nélkül el tud viselni [3.]. A cél minden esetben az, hogy olyan töltési körülményeket teremtsünk, amelyeknél nem áll fent a lítium réteg lerakódása az anódon, valamint a fölösleges hőmérséklet képződés. Alapvetően azt lehet mondani, hogy az optimális élettartam eléréséhez érdemes 1C-nél kisebb töltést alkalmazni, valamint lehetőség szerint kerülni az ultragyorstöltők használatát. Emellett érdemes tisztában lenni a tölteni kívánt cella típusával is, hiszen az NCA cellák jobban viselik az 1C feletti töltést még az LTO cellák esetében akár még az ultragyorstöltés is szóba jöhet. Ahogy azt az ábra is szemlélteti a nem megfelelően választott C-arány nagy mértékben rövidíti a cella élettartamát éppen, ezért az ajánlott C érték a legtöbb esetben 0,8C körül mozog. [31.]



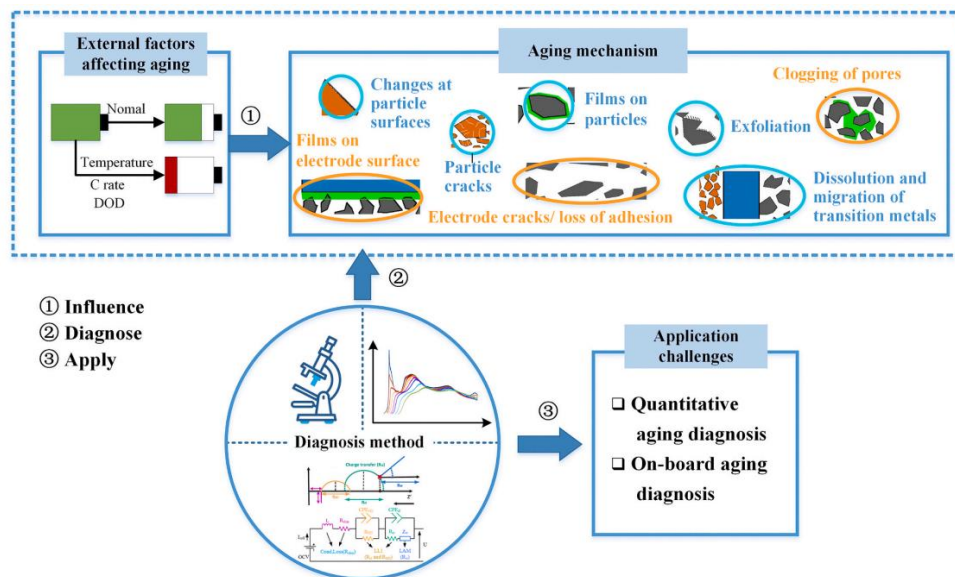
16. ábra Különböző C-arányú töltések és kisütések hatása a töltésiciklusszámra [31.]

3.6. Töltés gyakorisága (Cycling frequency)

A gyakori töltés is bizonyos mértékben hatással van a Li-ion cella élettartamára ugyanis a töltések számának növekedésével egy természetes károsodás következhet be a cellában, ami rövidíti annak élettartamát. Itt elsősorban az olyan fölösleges extra töltésekre kell gondolni, amikor mondjuk egy elektromos gépjárművel töltés után megteszünk néhány kilométert majd újra elkezdjük tölteni. Természetesen itt külön veszélyforrásként lép fel, hogy a túl gyakori töltés növeli a hibás töltési körülmények vagy éppen a túltöltés ($\text{SoC} > 85\%$) esélyét, amely szintén károsan hat a cellára. További kockázatot jelenthet, ha a töltéshez gyors- vagy éppen ultragyorstöltőt használnak hiszen ezek alkalmazása még normál töltési gyakoriság mellett is rövidíti a cella élettartamát, mivel a cellában belső feszültséget idéz elő. [32.]

3.7. Öregedés (Aging)

A cellák öregedése egy teljesen természetes folyamatnak tekinthető, hiszen használatukból adódóan rendszeres terhelésnek vannak kitéve. Azonban fontos kiemelni, hogy a celláknak gyakorlatilag kétféle öregedése van. Az egyik, amelyet **tervezett öregedésnek** is tekinthetünk akkor következik be, amikor a cellát a gyártója által elvártaknak megfelelően alkalmazzák és ügyelnek arra, hogy üzemeltetése mindig a gyártó által optimálisnak ítélt határok között történjen. Ebben az esetben, ha a gyártási minőség is megfelelő és a cellát egyéb nem tervezett behatás sem éri akkor a cella képes teljesíteni a gyártó által ígért élettartamot vagy töltési ciklusszámot [3.]. Azonban fontos kiemelni, hogy létezik **okozott öregedés**, amelyet akár egy egyszeri nem megfelelő használat is előidézhet. Az okozott öregedés mértékét nagyban meghatározza, hogy milyen paraméter kerül ki az optimális tartományból és mekkora mértékben. Hiszen egyes paraméterek optimálistól való eltérése csak kis mértékben öregíti a cellát, de vannak olyan paraméterek is, amelyeknél akár az egyszeri túlzott mértékű eltérés is a cella teljes és visszafordíthatatlan károsodását idézheti elő. A 17. ábra egy olyan keretrendszert szemléltet, amely alkalmas az öregedési mechanizmus diagnózisára emellett bemutatja az öregedési folyamatot nagyban befolyásoló tényezőket és magát a folyamatot is. [33.]



17. ábra Keretrendszer a Li-ion akkumulátor öregedési mechanizmusának szisztematikus diagnózisához [33.]

Az öregedés mértékére azért is fontos figyelni, mert egy adott mértékű öregedést követően az energiaforrás cseréje elkerülhetetlen, ami különösen a nagy akkumulátor csomagokat alkalmazó elektromos gépjárművek esetében rendkívül költséges.

3.8. Gyártás minősége (Manufacturing quality)

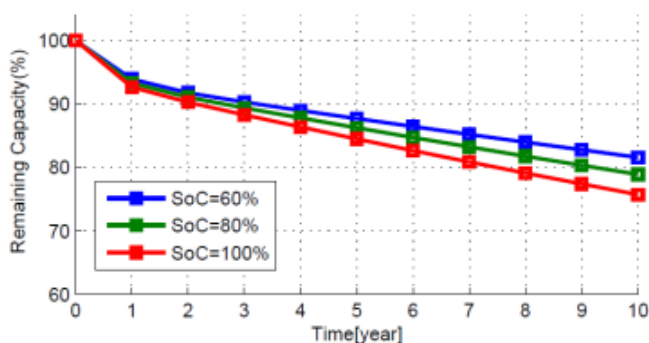
Mint bármilyen más eszköznél, így a Li-ion celláknál is komoly hatást gyakorol az élettartamra a gyártás minősége. Hiszen a cellát alkotó különböző komponensek mindegyike komoly hatással van magára a cellára, így a nem megfelelő gyártási minőség nagy mértékben lerövidítheti a cella élettartamát, de akár különböző meghibásodásokhoz vagy csökkent teljesítményhez is vezethet [34.]. Például egy rosszminőségű szeparátor könnyen rövidzárlatot okozhat a cellában. Emellett komoly kockázati tényezőként léphet fel a cellák nem megfelelő összeszerelése is, amelynek következménye lehet például az elektrolit szivárgása. További problémaként léphet fel, hogy az összeszerelt cellákat csak nagyon ritkán szerelik utólagosan szét, így a ténylegesen beépített komponensek nem feltétlenül egyeznek meg a gyártó által beépítettekkel, amelyet néhány tanulmányban is kimutattak. A tanulmányok továbbá kimutatták, hogy a szisztematikus minőségellenőrzési tesztek sok esetben hiányosak vagy teljes mértékben hiányoznak. Természetesen mindez jól mutatja, hogy a megfelelő minőségű gyártás, illetve a Li-ion cellákat gyártó cégek és a hozzájuk tartozó ellátásiláncok folyamatos minőségügyi ellenőrzése is rendkívül fontos, hogy a gyártott cellák minősége és így technikai paraméterei valóban egységesek legyenek [35.]. A 18. ábra a gyártási folyamatot szemlélteti nagy mértékben leegyszerűsítve.



18. ábra Akkumulátor gyártás egyszerűsített folyamatábrája [34.]

3.9. Használati szokások (Usage patterns)

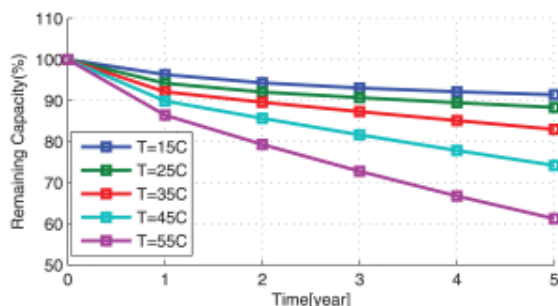
A használati szokások természetesen nagy mértékben befolyásolják az akkumulátor élettartamát hiszen számos korábban említett élettartam csökkentő hatás nagy mértékben függ attól, hogy az elektromos gépjárművet hogyan vagy éppen milyen gyakran vezetjük. Hiszen a szélsőséges használati körülményeket úgy, mint a túl mély kisütést, az akkumulátor túlmelegedését vagy éppen a gyors és ultragyors töltők túlzott mértékű használata mindenképpen kerülni kell az optimális élettartam biztosításához. Másrészt a tárolási körülmények is rendkívül fontosak, hiszen előfordulhat, hogy az akkumulátort hosszabb ideig nem építik be vagy éppen a beépített akkumulátor valamilyen oknál fogva hosszabb ideig nem kerül használatra. Ilyenkor, ahogy az a 8. ábrán is látható fontos, hogy a tároláshoz választott SoC értéke az optimális használati tartománynak nagyjából a középén helyezkedjen el. Ugyanis a tároláshoz használt magas SoC-vel párhuzamosan nő a cellák nyitott áramköri feszültsége (U_{open}), ami fokozza a SEI réteg képződést és elindíthatja az elektrolit oxidációját a cellán belül, ami növeli a belső ellenállást és ezzel párhuzamosan kapacitás csökkenést okoz. [36.]



19. ábra Különböző SoC-val tárolt akkumulátorok kapacitás vesztese [36.]

A hőmérséklet, ahogy a használat úgy a tárolás során is az akkumulátor élettartama szempontjából a legkritikusabb tényező, hiszen pontosan ugyanazokat a hatásokat váltja ki az akkumulátorból, mint használat során, azonban fontos kiemelni, hogy tárolás során a különböző biztonsági és BMS rendszerek általában nem működnek, így a szélsőséges tárolási hőmérsékletek és az általuk okozott esetleges stressz sokkal könnyebben képesek kárt tenni a Li-ion akkumulátorokban. Ezt a 9. ábra is jól szemlélteti, amelyen jól látható, hogy az

optimálisnál magasabb tárolási hőmérsékletek már rövid időn belül komolyan képesek károsítani az akkumulátort.



20. ábra 50%-os SoC-n tárolt akkumulátorok kapacitás vesztese különböző hőmérsékleten [36.]

Létezik még egy olyan használati szokás, amely nagy mértékben rövidíthető az akkumulátor élettartamát ez pedig az, amikor az akkumulátort nem hagyjuk pihenni, így nincs ideje az akkumulátornak lehűlni, illetve arra sincs idő, hogy az akkumulátorban lévő felesleges stressz megszűnjön például egy amúgy is károsnak mondható gyorsöltést követően. Éppen ezért rendkívül fontos, hogy a töltést követően lehetőleg ne terheljük azonnal az akkumulátort. [32.,36.]

3.10. Nem megfelelő töltési szokások

A nem megfelelő töltési szokások esetében egyrészt fontos beszélni a gyors és ultragyors töltők túlzott mértékű használatáról, amelyek használata főleg hőmérsékletet és stresszt generál az akkumulátorban, ezzel csökkentve annak élettartamát. Természetesen előfordulhatnak olyan helyzetek amikor ezen töltők használata elengedhetetlen és szükséges azonban rendszeres használatukat mindenképpen érdemes mellőzni. [32.]



21. ábra Különböző típusú EV töltők [37.]

A másik ilyen töltési szokás alapvetően az SoC-hoz és DoD-hoz köthető ugyanis sokan egyszerűen a töltőn hagyják az akkumulátort, ami azt eredményezi, hogy az akkumulátor SoC

értéke eléri a 100%-ot ez pedig, ahogy az már a 2.2.2-es pontban már bemutatásra került azt eredményezi, hogy az akkumulátort főleg stressznek és degradációnak tesszük ki. Éppen ezért a töltés során mindenképpen figyelni kell arra, hogy mikor értük el az optimális SoC tartomány tetejét, amelyre az elektromos gépjárműgyártók is javaslatot, hogy az akkumulátor optimális élettartamát garantálni tudják.

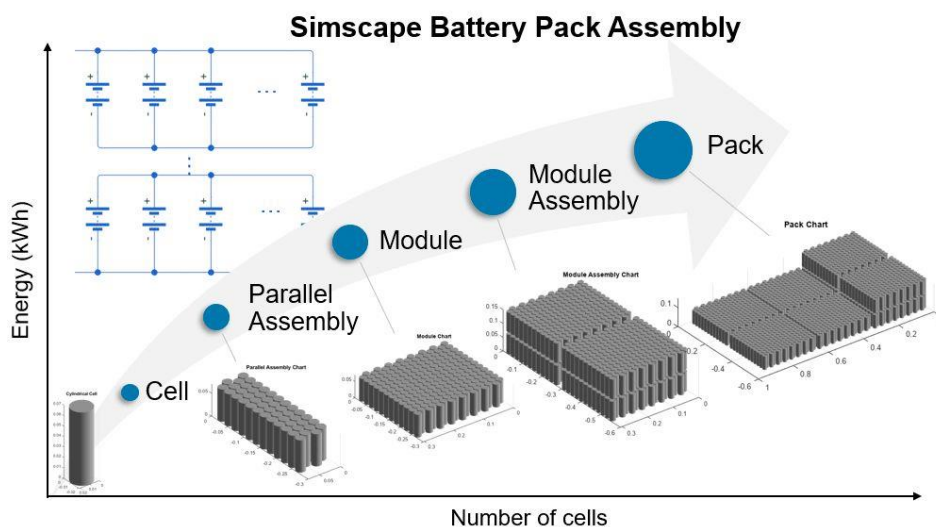
3.11. Karbantartás (Maintenance)

Mint minden eszköz esetében, így a Li-ion akkumulátoroknál is rendkívül fontos szerepet játszik a megfelelő és rendszeres karbantartás az optimális élettartam elérése érdekében. A rendszeres karbantartásnak köszönhetően egyfelől az akkumulátorhoz tartozó különböző szoftverek frissítésre kerülnek, amely csökkenti a szoftveres rendszerek meghibásodásának vagy szuboptimális működésének veszélyét. Emellett az ilyenkor elvégzett ellenőrzéseknek köszönhetően a komolyabb potenciális hibák előjelei detektálhatók és a szükséges prevenciós lépések elvégezhetők még mielőtt komolyabb probléma keletkezne vagy az akkumulátor meghibásodna. A rendszeres karbantartás részének tekinthető az is, hogy figyelünk az akkumulátorral kapcsolatos intőjelekre, mint például a csökkent hatótávolság vagy éppen a megnövekedett töltési idő, ilyen esetekben egy időben elvégzett szervízzel jelentősen növelhetjük az akkumulátor élettartamát.

3.12. Akkumulátorcsomag kialakítása (Design of the batterypack)

Az akkumulátorcsomag kialakítása szintén kulcsfontosságúnak tekinthető az optimális élettartam elérése céljából. A tervezés során azonban nem csak a felhasználandó elektrokémiai cellák típusát kell megválasztani, hanem azt is, hogy ezekből hányat kötnek párhuzamosan, illetve ezt követően sorosan, ezzel megszabva az akkumulátor kapacitását és feszültségét. Ráadásul a már összekötött cellákat is kisebb úgynevezett akkumulátor modulokba (vagy alcsomagokba) rendezik, ezzel megkönnyítve az akkumulátor későbbi karbantartását, illetve a tervezés során szintén kulcsfontosságú hőmérsékletszabályozó rendszer kialakítását. Ahogy az már korábban is említésre került az akkumulátor élettartama szempontjából a megfelelő hőmérséklet tekinthető az egyik legkritikusabb tényezőnek, így az akkumulátorcsomag kialakítása szempontjából a hőmérsékletszabályozó rendszer kialakítása valóban kulcskérdésnek tekinthető. A tervezés során azonban nem csak arra kell ügyelni, hogy melyik megoldással érhető el a legjobb hőmérsékletszabályozás, hiszen a szabályozórendszer működtetéséhez szükséges energiamennyiség és a végeredményként kapott akkumulátorcsomag tömege is szintén kulcskérdés az optimális hatótávolság elérése

tekintetében. Éppen ezért az akkumulátorcsomag tervezése egy rendkívül komplex és sokrétű feladat, azonban tanulmányokban igazolták, hogy az akkumulátorcsomag optimális designjának megtalálása egyértelműen kulcsfaktor az akkumulátor élettartamát tekintve, hiszen a megfelelő kialakítás megtalálásával a várható élettartam akár 5%-12%-kal is növelhető [38.].



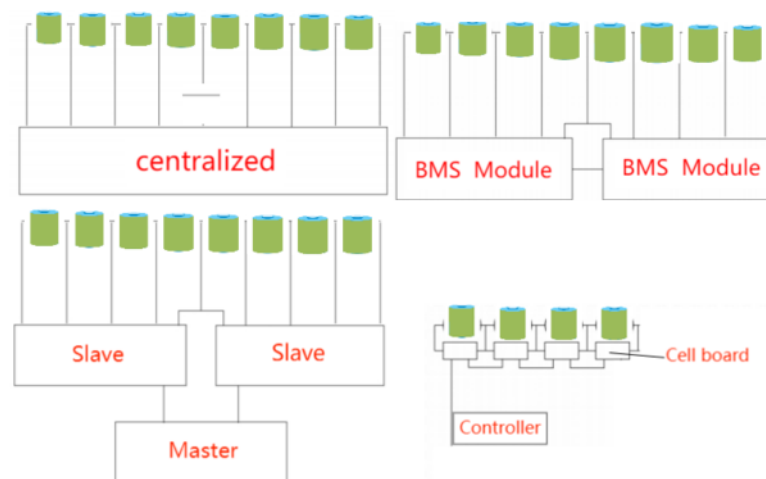
22. ábra Akkumulátorcsomag létrehozása az önálló cellából kiindulva [38.]

3.13. Akkumulátor menedzsment rendszerek (BMS)

Fontos még szót ejteni az akkumulátor menedzsment rendszerekről (BMS) is, mint az optimális élettartamot befolyásoló tényezőkről. Hiszen, ahogy az a 2.1.3-as pontban már említésre került ez a rendszer kulcsfontosságú az akkumulátor biztonságos működése szempontjából, így nem megfelelő működése számos problémát okozhat. A BMS egyik fő feladata a cellák közötti egyensúly kialakítása is fenntartása, ami különösen a sorban kötött cellák esetében fontos. Ahogy az korábban már említésre került az akkumulátorban a nagyobb üzemi feszültség elérése érdekében a cellákat sorba kell kötni, ami azt is jelenti, hogy minél nagyobb a szükséges üzemi feszültség annál több cella kerül bele az adott soros kapcsolásba. A sorba kötött cellák számának növelése pedig komoly kihívásokat idéz elő, hiszen a soroskapcsolásban könnyen előfordulhatnak feszültség kiegyensúlyozatlanságok, mivel a legkisebb kapacitás vagy SoC eltérés is felnagyobbodik a sorozatban. A megfelelő BMS feladata ennek megakadályozása ezzel elkerülve a cellák felgyorsult degradációját és aránytalan kihasználtságát az akkumulátoron belül. A másik probléma, hogy a sorban kötött cellák sokkal érzékenyebbek a hőmérsékletre és alapjában véve nem egységesen hűlnek és melegednek, ami lokális meleg pontokat és ezáltal egyes cellákban felgyorsult degradációt idézne elő. Éppen ezért a BMS feladata, hogy a cellákat megfelelően monitorozza és biztosítja

az akkumulátoron belüli egységes hőmérsékletet a megfelelő hőmérséklet szabályzó rendszerrel. A párhuzamosan kötött cellák esetében pedig a meghibásodott cellák jelenthetnek gondot, mivel ezek csökkentik a teljesítményt és biztonsági kockázatot is jelenthetnek, így a BMS fő feladata ezek leválasztása amennyiben ez lehetséges. A másik fontos tényező párhuzamos kötésben elhelyezkedő gyengébb cellák kiszűrése, mivel ebben az esetben minden cellának azonos terhelést kell elviselni, így ezen cellák degradációs folyamata még inkább fokozódik. Természetesen az akkumulátorban található sorosan és párhuzamosan kapcsolt cellák számának növelésével a BMS rendszer komplexitása és a szükséges szenzorok száma is növekszik, ami több vezeték, precízebb kommunikációt és fejlettebb megfigyelő és vezérlő algoritmusokat igényel. Természetesen a formai tényezők és cella specifikációk megfelelő kiválasztásával a BMS rendszer bonyolultsága jelentősen csökkenthető, azonban ezek szabad megválasztását sokszor más tényezők, mint például a robusztusság vagy éppen a rendelkezésre álló hely mennyisége befolyásolják [3.,40.]

Emellett fontos megemlíteni, hogy a BMS rendszer kialakításának is számos módja van, amely hatással lehet a BMS hatékonyságára, érzékenységre vagy éppen kialakításának költségeire. A 12. ábrán 4 féle BMS rendszer látható, amelyek a centralizált, a moduláris, a master-slave és az elosztott BMS rendszer, amelyeknek több előnye és hátránya is van [40.]



23. ábra Különböző BMS rendszerek [40.]

4. LI-ION AKKUMULÁTOR MODELL MEGVALÓSÍTÁSA

A Li-ion akkumulátor modelljének megvalósítására elsődlegesen két eltérő modell használható, amelyek az elektrokémiai modell, valamint az ekvivalens áramkörti modell (ECM). Mindkét modell típus adat vezérelt (data driven), így létrehozásukhoz a megfelelő mennyiségben rendelkezésre álló mérési adat elengedhetetlennek tekinthető.

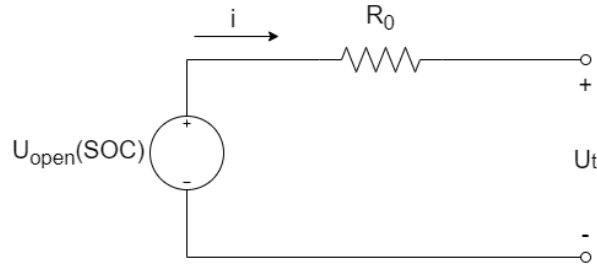
Az elektrokémiai modellek alapvetően a Li-ion akkumulátorok molekuláris szintű viselkedésén alapszanak éppen ezért az ECM-eknél általában pontosabbak, azonban létrehozásuk rendkívül komplex feladat, hiszen sokkal több változót és komplexebb egyenleteket igényelnek, mint az ECM-ek. Emellett számításiigényük, szimulációs idejük, valamint adatigényük is nagyobb, mint az ECM-eké éppen ezért alkalmazásuk olyan komplex rendszerek és megoldások esetében lehet indokolt, amelyeknél a valós rendszer maximális pontosságú leképezése a cél.

Az ECM-ek a Li-ion akkumulátorokat elektromos komponensek, mint például ellenállások és kondenzátorok, segítségével reprezentálják. A modell létrehozásához szükséges egyenletek kevésbé komplexek és kevesebb változót igényelnek továbbá követik a Kirchhoff és Ohm törvényeket. Mindezeknek köszönhetően az ECM-ek komplexitása általában kisebb, mint az elektrokémiai modelleké, ami a gyakorlatban kisebb számítási- és adatigényt, valamint alacsonyabb szimulációs időt eredményez. Az így létrehozott modell pontossága pedig az applikációk többségéhez tökéletesen megfelelő.

Dolgozatomban a Li-ion akkumulátor szimulálására ekvivalens áramköri modellt fogok alkalmazni, mivel az általam választott applikációhoz szükséges pontosság, a rendelkezésre álló mérési adatmennyiség, valamint a szimulálni kívánt rendszer komplexitása az elektrokémiai modell alkalmazását nem indokolja.

4.1. Ekvivalens áramköri modell (ECM):

Az ekvivalens áramköri modellek legegyszerűbb típusa a Rint modell, amely az akkumulátor szimulálásához egyetlen ellenállást használ. A Rint modell használata egy lineáris feszültség karakterisztikával rendelkező akkumulátor modellt eredményezne, amely nem lenne képes megfelelően tükrözni az akkumulátor viselkedését. Hiszen a valós cella feszültségkarakterisztikája többek között az akkumulátorban lejátszódó elektrokémiai folyamatoknak és azok belső ellenállásra gyakorolt hatásának köszönhetően nem lineáris. Ez a gyakorlatban azt eredményezi, hogy a nyitott áramköri feszültség értéke az SoC változásával nem egyenletesen változik.

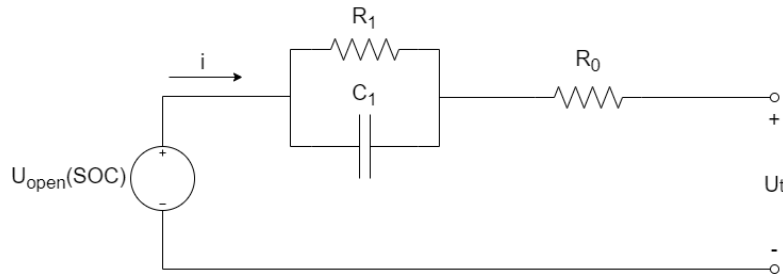


24. ábra Rint modell (Saját ábra)

A Rint modell egyenlete:

$$U_t = U_{open} - i \cdot R_0 \quad (14)$$

Mivel a Rint modell csak egy egyszerűsített, dinamikus vonásokat nélkülöző akkumulátor modell létrehozását tenné lehetővé, így dolgozatomban ez a modell semmiképpen sem használható. A Rint modellt egy RC taggal kiegészítve létrehozhatunk egy 1RC modellt (Thevenin modell), amely már képes leképezni az akkumulátor dinamikus viselkedését is. Ez a modell további RC tagok használatával akár tovább is pontosítható, azonban minden újabb RC tag beiktatása növeli a modell számítás- és adatigényét, valamint a szimulációs időt. Éppen ezért az RC tagok számát nem érdemes 3 fölé emelni, illetve az alkalmazott RC tagok számának meghatározásakor érdemes figyelembe venni a reprezentálni kívánt rendszer komplexitását is.



25. ábra 1RC (Thevenin) modell (Saját ábra)

Az 1RC modell egyenletei:

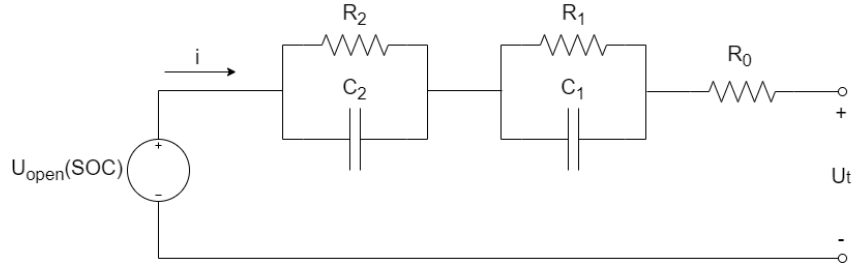
$$U_t = U_{open}(SoC) - i \cdot R_0 - U_1 \quad (15)$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{U_1}{C_1 \cdot R_1} + \frac{i}{C_1} \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (17)$$

Ahogy az korábban már említésre került a Rint modell akár több RC taggal is ellátható, amelynek köszönhetően az akkumulátor dinamikus viselkedése még jobban leképezhető. Erre egy kiváló példa a 2RC modell (DP modell), amelyben a Rint modell két RC párral kerül kiegészítésre. Ezzel a modellel a már a komplexebb Li-ion akkumulátor csomagok is jól

reprezentálhatóak, amennyiben megfelelő mennyiségű mérési adat áll a rendelkezésünkre, valamint a szimuláció futtatásához használt eszköz rendelkezünk a futtatásához szükséges számítási kapacitással.



26. ábra 2RC (DP) modell (Saját ábra)

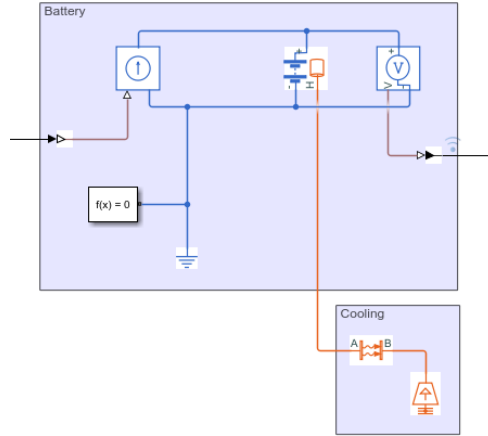
A 2RC modell egyenletei:

$$U_t = U_{open}(SoC) - i \cdot R_0 - U_1 - U_2 \quad (18)$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{U_2}{C_2 \cdot R_2} + \frac{i}{C_2} \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} \quad (20)$$

Dolgozatomban az akkumulátor modelljének elkészítéséhez a MATLAB/Simulinket választottam és azon belül a „Battery (Table-Based)” blokkra építettem fel a modellt. A Battery (Table based) Simscape blokk alkalmazása esetén ugyanis lehetőség van bizonyos akkumulátor típusok esetében a gyártó által megadott, előre definiált paraméterek felhasználására. Ezen paramétereket alapvetően kétféleképpen tudjuk a modellhez felhasználni. Az egyik lehetséges megoldás az paraméterek teljes felhasználása. Ez a módszer akkor lehet célravezető, amikor a szimulálni kívánt akkumulátorunk teljesen új állapotú vagy pontosan tudjuk, hogy az adott akkumulátor hány teljes cikluson esett át. A másik módszer a gyártói paraméterek és a mérési adataink felhasználásával megbecsült paraméterek kombinált alkalmazása. Ez a módszer lehetőséget kínál olyan akkumulátorok megfelelően pontos modellezésére is, amelyeket már korábban használtunk és nem ismert a rajtuk végzett töltési és merítési ciklusszám. Emellett ezen módszer alkalmazásával a modellünk sokkal akkumulátor és applikáció specifikusabbá tehető. Dolgozatomban az elérő definiált és becsült paraméterek kombinált alkalmazása mellett döntöttem, hogy az elkészített akkumulátor modell a lehető legpontosabban tükrözze a valóságot.



27. ábra Az akkumulátor MATLAB/Simulink modellje (Saját ábra)

A következőkben az általam készített Simulink modell megfelelő működtetéséhez szükséges egyenleteket szeretném ismertetni.

Az akkumulátor kapacitása:

$$Q(T, n) = \left(1 + \frac{\delta_{Q_n}}{100} \cdot \sqrt{\frac{n}{N}} \right) \cdot Q_n \quad (21)$$

Az akkumulátor töltöttségi állapota:

$$SoC(t) = \frac{1}{Q_{(T,n)}} \cdot \int \left(i(t) - \frac{U_{open}(T, n, t)}{R_{SD}(T, n)} \right) dt \quad (22)$$

A nyitott áramköri feszültség változása a töltési ciklusok számának növekedésével:

$$U_{open, fade} = U_{open} \cdot \left(1 + \frac{\delta_{U_{open}}}{100} \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (23)$$

Az akkumulátor kapacitásának csökkenése a töltési ciklusok számának növekedésével:

$$Q_{fade} = Q \cdot \left(1 + \frac{\delta_{Q_n}}{100} \cdot \sqrt{\frac{n}{N}} \right) \quad (24)$$

Az ellenállások öregedése a töltési ciklusok számának növekedésével:

$$R_{j, fade} = R_j \cdot \left(1 + \frac{\delta_{R_j}}{100} \cdot \sqrt{\frac{n}{N}} \right) \quad (25)$$

Az akkumulátor hőmérséklete:

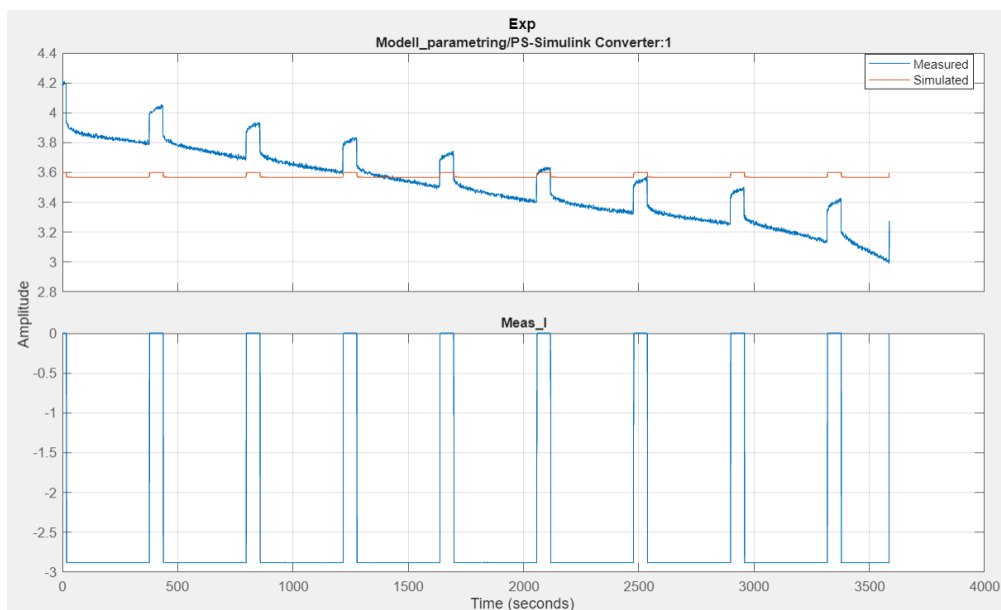
$$M_{th} \cdot \dot{T} = \sum_j \frac{U_{T,j}^2}{R_{T,j}} \quad (26)$$

5. LI-ION AKKUMULÁTOR MODELL PARAMÉTEREINEK BECSLÉSE

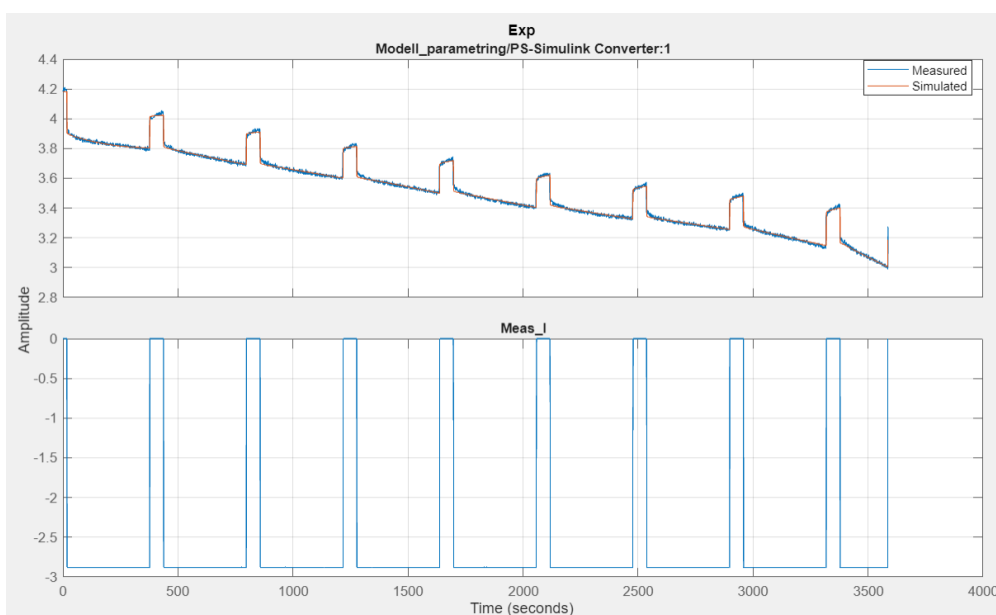
Ahogy azt már korábban említettem dolgozatomban egy olyan ECM alapú akkumulátor modellt fogok használni, amely részben a gyártó által megadott előre definiált paramétereket, részben pedig mérési adatok alapján becsült paramétereket használ. A paraméterek becsléséhez a MATLAB/Simulinkben található Parameter Estimator appot használtam, amely a Simulink modell paramétereinek és belső állapotainak becslését teszi lehetővé mérési adatok felhasználásával. Ezzel növelhető a modell pontossága, így annak viselkedése jobban fog hasonlítani a modellezni kívánt hardwarére. A Parameter Estimator segítségével lehetőség nyílik az ekvivalens áramköri modell alkalmazásával létrehozott akkumulátor modell felparametrizálására, amennyiben rendelkezésünkre áll a valódi akkumulátor cellán mért terhelési áram, illetve az adott terheléseknél kapott kimeneti feszültség. A paraméter becslés során a szoftver egy optimalizációs problémát hoz létre, amelynek megoldásaként kapjuk meg a becsült paramétereket. A becslési eljárást az adott mérési adatokkal egy 1RC modellen és egy 2RC modellen is elvégeztem, hogy megtaláljam a dolgozatom szempontjából optimálisabb ECM-et. A paraméter becslés elvégzéséhez az alábbi értékekre van szükség:

- x_b – Minden olyan érték, amelyet az optimalizációs probléma megoldása során megszerelnénk becsülni
- $F_0(x_b)$ – Ez a függvény számítja ki szimulált és mért értékek közötti különbséget
- $\underline{x}_b \leq x_b \leq \overline{x}_b$ – határértékek – Lehetőségünk van megadni a tervezési változók alsó és felső határértékeit a becslési folyamat megkezdése előtt

A Parameter Estimator app a meghatározott célokat és határértékeket figyelembe véve finomhangolja a becsült paramétereket, úgy, hogy azok felhasználásával a modell viselkedése a lehető legpontosabban visszaadja a valós hardware viselkedését. Ahogy azt a 28. ábra is szemlélteti az akkumulátor modell által a terhelési áramra adott kimeneti feszültség a paraméter becslési eljárást megelőzően egyáltalán nem hasonlít a valós akkumulátoron mért kimeneti feszültségre. Azonban a paraméterbecslést követően a becsült paramétereket alkalmazó ECM már szépen közelíti a valós mérési eredmények, ahogyan az a 29. ábrán is látható. Ebből is látható, hogy amennyiben rendelkezésre áll a megfelelő mennyiségű és minőségű mérési adat úgy a paraméter becslési eljárás alkalmazásával az akkumulátort leíró paraméterek jól közelíthetők.



28. ábra Az adott terhelési áramra adott valós és szimulált válasz a paraméter becslést megelőzően



29. ábra Az adott terhelési áramra adott valós és szimulált válasz a paraméter becslést követően

A Parameter Estimator a becslés során hangolja a becsülni kívánt paramétereket, hogy megkapja a szimulált választ, amely igyekszik lekövetni a mért/referencia választ. A becslési folyamat során az Estimator igyekszik minimalizálni a becslési hibát, amely a szimulált és referencia válasz különbségeként írható le.

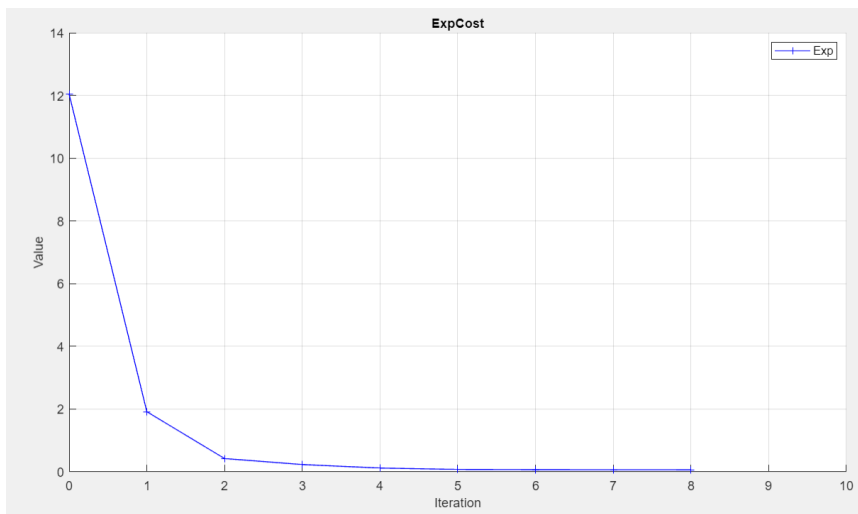
$$E(t) = y_{ref}(t) - y_{sim}(t) \quad (27)$$

A Parameter Estimator app az éppen aktuális paraméter becslés pontosságának megállapításához a Sum squared error (SSE) költség függvényt használja, amely megmutatja,

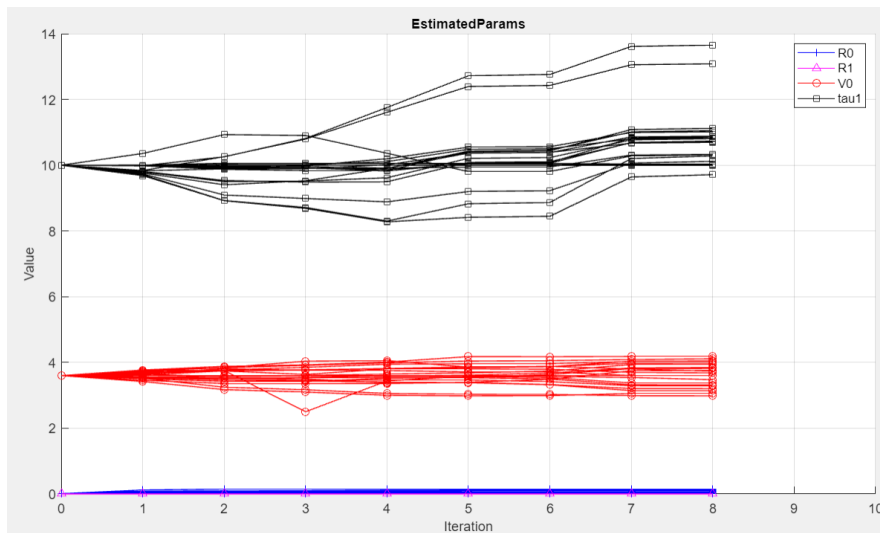
hogy a regressziós modell mennyire jól illeszkedik a mérési adatokhoz. A számítása a becslt és a mért érték különbségének felhasználásával történik:

$$F_o(x_b) = \sum_{t=0}^G (E(t))^2 \quad (28)$$

Az egyes becslések során a szoftvert a költségfüggvényt egy meghatározott időintervallumig futtatja, amely alapvetően a mért jel és a szimulált jel időintervallumától függ. Azonban alapbeállítások alkalmazása esetén a szoftver csak a mért jel időintervallumát veszi figyelembe. A költségfüggvény értékének alakulását a 30. ábra még a becslt paraméterek értékének alakulását a 31. ábra szemlélteti.



30. ábra A költségfüggvény értékének alakulása az egyes iterációkat követően



31. ábra Az egyes becslt paraméterek alakulása az iterációk során

A becslési folyamat felgyorsítása érdekében a Parameter Estimator-t a Parallel Computing Toolbox™-el együtt használtam, amely lehetővé teszi, hogy a MATLAB

párhuzamos szimulációkat futtasson több MATLAB munkamenet (másnéven worker) segítségével, ezzel jelentősen rövidítve a teljes becsléshez szükséges időt, hiszen a teljes becslési folyamat időigényét az egyes szimulációk időigényei határozzák meg. Ez az eljárás nem minden egyes a Parameter Estimator-ben elérhető optimalizációs módszer esetén használható azonban az általam is használt nem lineáris legkisebb négyzetek módszer lehetővé tette a párhuzamos számítás használatát.

Az egy iterációhoz szükséges idő a párhuzamos számítás használata nélkül:

$$t_{total} = t_{sz} \cdot (1 + (2 \cdot N_p) + N_{ls}) \quad (29)$$

Az egy iterációhoz szükséges idő a párhuzamos számítás használatával:

$$t_{totalP} = t_{sz} \cdot \left(1 + \left(2 \cdot \text{ceil} \left(\frac{N_p}{N_w} \right) \right) + N_{ls} \right) \quad (30)$$

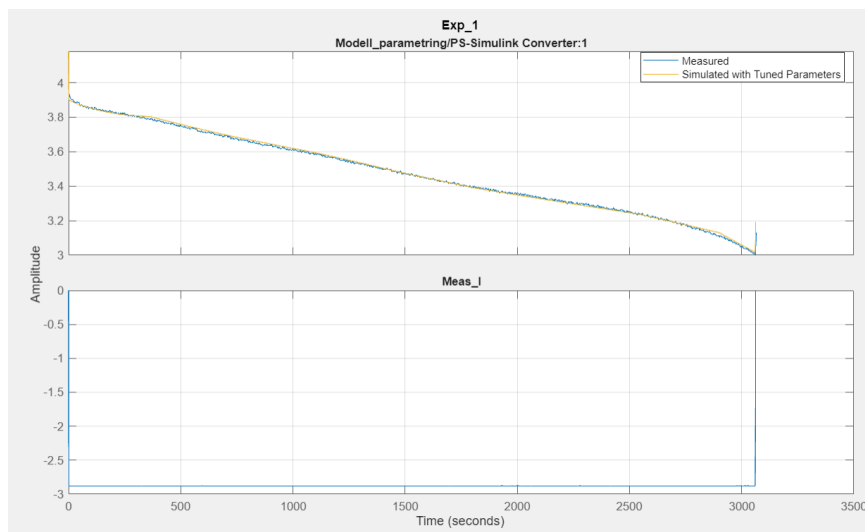
A párhuzamos számítás alkalmazásával várható becslési idő csökkenés:

$$\alpha = \frac{t_{totalP}}{t_{total}} = \frac{\left(1 + \left(2 \cdot \text{ceil} \left(\frac{N_p}{N_w} \right) \right) + N_{ls} \right)}{(1 + (2 \cdot N_p) + N_{ls})} \quad (31)$$

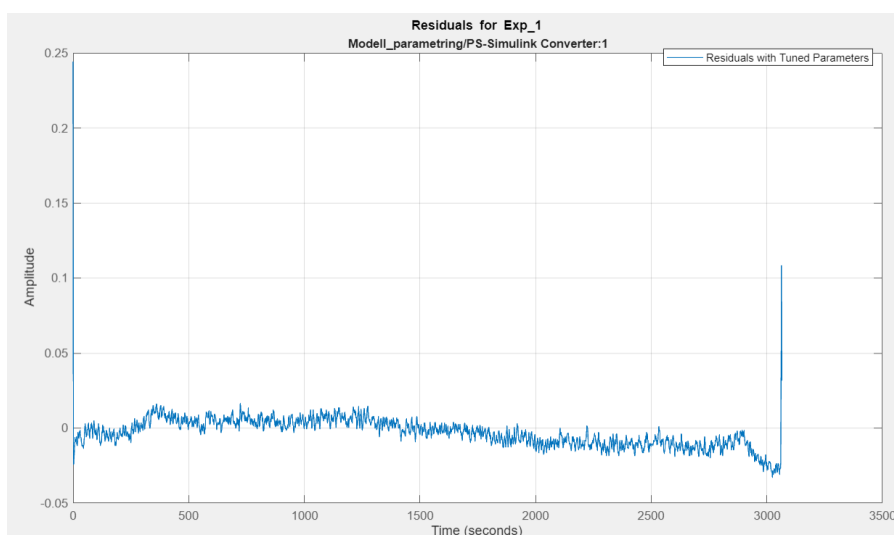
A saját paraméter becslési folyamatom során a Simulink összesen 8 workert használt a párhuzamos szimulációk futtatásához, így a paraméter becsléshez szükséges idő megközelítőleg az 1/8-adára csökkent. Ez már az én modellem esetében is jelentős időmegtakarítást jelentett, hiszen a párhuzamosítás alkalmazása mellett az 1RC modell paramétereinek becslése ~15 percet még a 2RC modell paramétereinek becslése ~26 percet vett igénybe. Ebből is jól látható, hogy a párhuzamos számítás alkalmazása különösen fontos, hiszen az alkalmazott modell komplexitásának növekedésével a becslési idő is jelentősen emelkedik.

A paraméterek becslését követően egy másik mérési adatsort felhasználva elvégeztem a becsült paraméterek validálását is, így ellenőrizni tudtam a becsült paraméterek és a létrehozott akkumulátor modell pontosságát. A validálást követően arra a döntésre jutottam, hogy dolgozatomhoz az 1RC modellt fogom használni ugyanis az a paraméterezést követően jobban visszaadta a valódi akkumulátor viselkedését. Ennek oka valószínűleg a rendelkezésre álló adatmennyiségben, valamint a szimulálni kívánt rendszer komplexitásában keresendő. A validáció során kapott eredményt a 32. ábra még a mért és a valós eredmény közötti különbséget a 33. ábra szemlélteti. Az ábrákon jól látható, hogy a becsült paramétereket alkalmazó modell egy másik terhelési áram alkalmazása esetén is jól visszaadja a valódi Li-ion cella viselkedés.

Ez azt jelenti, hogy a paraméter becslést követően az ECM modell alkalmassá vált arra, hogy a szimulációk során a valós cella működését és viselkedését reprezentálja.



32. ábra A paraméter becslés eredményének validálása másik mérési adatsor használatával



33. ábra A mért és a valós feszültség értékek közötti eltérés mértéke

6. LI-ION AKKUMULÁTOR ÁLLAPOT BECSLÉSÉNEK MEGVALÓSÍTÁSA

Dolgozatomban célom az általam készített Li-ion akkumulátor modell felhasználásával az SoC és SoH becslésének megvalósítása, amelyet a következőkben szeretnék ismertetni. Az SoH becslés egyik fontos paraméterei az SoC, így először ennek becslését szeretném ismertetni.

Az SoC becslésére számos különböző módszer áll rendelkezésünkre, amelyek eltérő számításiigénnyel, illetve várható pontossággal rendelkeznek. Ezek közül a legegyszerűbb megoldás, amikor létrehozunk egy look up table-t, amelyben minden nyitott áramkörüi feszültség értékhez hozzárendelünk egy SoC értéket. Ennek a módszernek az előnye, hogy rendkívül

egyszerű és nincs nagy számítási igénye, azonban ebben az esetben rendkívül pontos mérésekre van szükségünk, illetve a becslési algoritmusunk rendkívül érzékeny lesz a hőmérsékletre is.

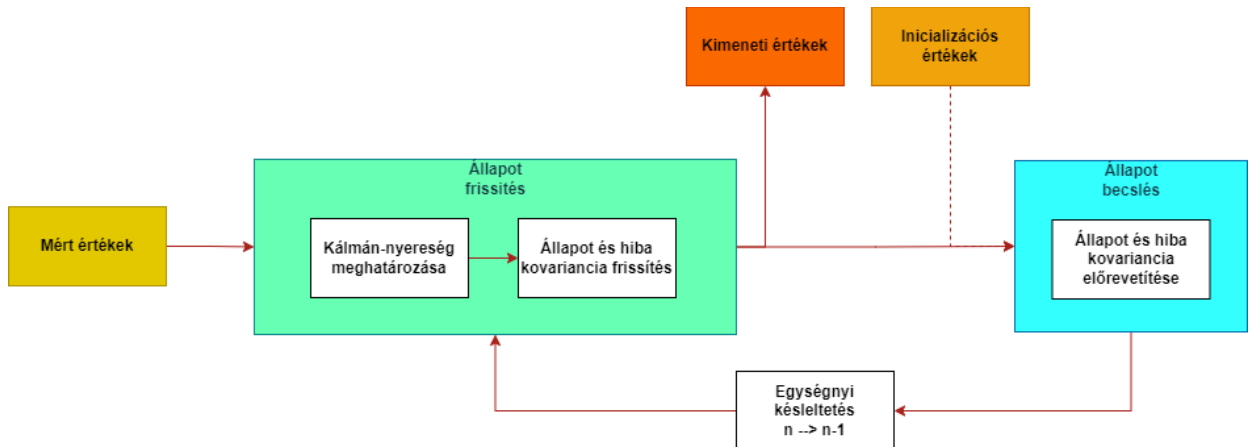
Egy másik megoldás lehet a Coulomb számlálási módszer alkalmazása, amely nem igényel look up tablet viszont megvalósításához rendkívül fontos a cella kapacitásának és a kezdeti SoC-nek a pontos becslése ugyanis ez a módszer nem tartalmaz semmilyen visszacsatolást, így a kezdeti SoC téves megadása egy végleges eltolódást eredményez a teljes becslés során. A Coulomb számláló módszer másik nagy előnye, hogy a teljes becslési eljárás leírható egyetlen egyenlet segítségével, amely a következő:

$$SoC(t) = SoC(t - 1) \pm \frac{\int_0^t i \, dt}{Q_n} \quad (32)$$

A cella SoC értékének becslésére az egyik legjobb megoldásnak a Kálmán szűrő alkalmazása tekinthető. A Kálmán szűrő egy olyan becslési algoritmus, amely kombinálja a mérést és a becslést, hogy megtalálja az optimális becslt értéket ugyanis a mérési és becslési eredmények együttes alkalmazásával kisebb variancia és így kisebb bizonytalanság érhető el. A Kálmán szűrő megfelelő alkalmazásához jól kell ismerni és modellezni a rendszert, valamint annak paramétereit, emellett figyelembe kell vennünk, hogy a Kálmán szűrő által végzett becslés érzékeny lesz a feldolgozási zajra, valamint a mérési zajra. A feldolgozási zajnak a rendszer állapotbecslésében lévő eltérést vagy hibát tekintjük, amelyet okozhatnak egyszerűsítések, a nem megfelelően modellezett dinamika vagy éppen a paraméterekben megjelenő bizonytalanság. A mérési zaj a mért jelben megjelenő eltérés vagy hiba, amelyet a szenzor pontatlansága, külső zajforrás vagy akár kábelezési gondok is okozhatnak. Mivel a szűrő által végzett becslés érzékeny ezekre a zajokra, ezért rendkívül fontos a feldolgozási zaj kovariancia (Q), valamint a mérési zaj kovariancia (R) értékének megfelelő kiválasztása. Hiszen, ha a Q értéke túlságosan alacsony akkor az algoritmus 0-nak fogja becsülni, ami hibás eredményhez vezethet. Miközben, ha a Q és R értéke nagyon magas akkor az algoritmus csak lassan konvergál, ami nagy eltérést okozhat az eredményben.

A Kálmán szűrő segítségével megbecsülhető olyan rendszerek állapota és paramétereit, amelyek direkt mérése nem lehetséges, de indirekt mérése igen. A szűrőben található visszacsatolás az egyenletek jobb szabályozását teszi lehetővé, ezzel garantálva a hiba gyorsabb kiküszöbölését. Ez azért rendkívül fontos, mert minél hamarabb tűnik el a hiba annál hamarabb fog a becslt állapot ($\hat{x}$) konvergálni a valós állapothoz (x). A Kálmán szűrő megfelelő működtetéséhez elengedhetetlen a Kálmán-nyereség (K), amelyet a rendszer minden ciklusban

kiszámít. A Kálmán-nyereség egy súlyozási faktor, amelynek értéke 0 és 1 közötti és meghatározza, hogy az algoritmus milyen mértékben veszi figyelembe a becslt, illetve a mért értékeket. A Kálmán-nyereség magas értékénél az algoritmus a mért értéket még alacsony értékénél a becslt értéket veszi jobban figyelembe. Amennyiben a Kálmán nyereség értéke 0.5 úgy mindkét értéket azonos mértékben veszi figyelembe az algoritmus. Természetesen léteznek szélsőséges esetek is, hiszen $K=1$ esetén a becslt értéket még $K=0$ esetén a mért értéket nem fogja figyelembe venni az algoritmus.



34. ábra A Kálmán szűrő működési elve (Saját ábra)

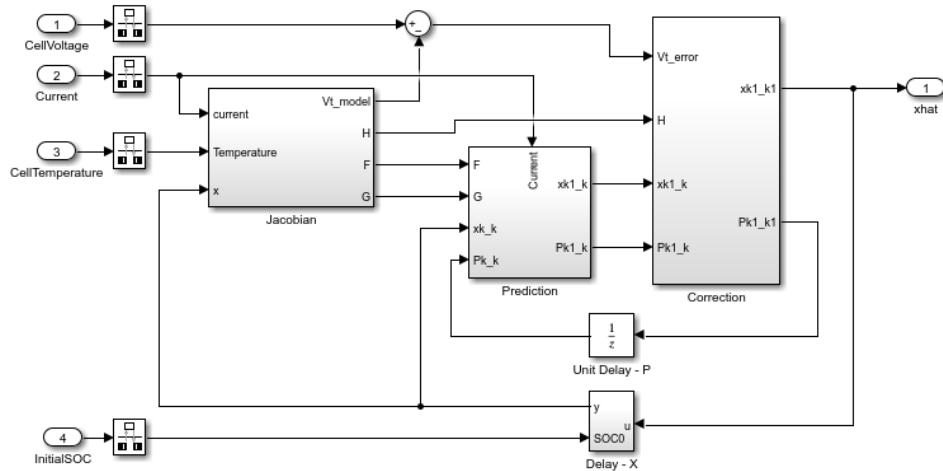
A Kálmán szűrő első lépésként egy inicializációt végez, amely során a rendszer kiinduló értékei meghatározásra kerülnek. Ezek az értékek származhatnak egy másik rendszertől, de lehetnek akár tapasztalati vagy elméleti tudás alapján becsltek is. Az inicializációs értékek beolvasására csak egyszer kerül sor. Az inicializációt követően az algoritmus egy állapot becslési lépést hajt végre, amely során a rendszer jövőbeli állapotának és hiba kovarianciájának előrejelzése történik. Ezt követően az algoritmus a mért értékeket, valamint az állapot becslés késleltetett értékét felhasználva elvégzi az állapot frissítést, amely során meghatározásra kerül a Kálmán-nyereség, illetve ennek felhasználásával megtörténik az rendszer állapotának és hiba kovarianciájának frissítése is. Ezzel a lépés lezárul az algoritmus első ciklusa. Ezt követően az algoritmus a következő lépésekből álló loop-ot futtatja a becslésekhez:

- Állapot becslés, amelyhez azonban az algoritmus már az állapot frissítés során kapott állapotot és hiba kovarianciát fogja felhasználni.
- Állapot frissítés a megfelelő mért értékek és a késleltetett becslt értékek felhasználásával.

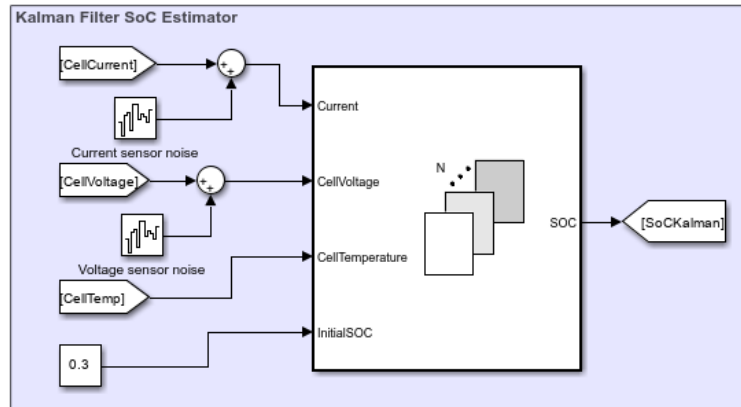
A sima Kálmán szűrőt alapvetően lineáris rendszerekhez alkalmazzák, azonban a Kálmán szűrő bizonyos változatai, mint például a kiterjesztett Kálmán szűrő (EKF) jól kezelik a

nemlineáris rendszereket is. Dolgozatomban a kiterjesztett Kálmán szűrőt fogom használni, mivel az általam becsülni kívánt rendszer nemlineáris azonban linearizációval jól közelíthető.

A MATLAB/Simulink remek környezetet kínál egy EKF alapú állapotbecslési modell megvalósításához, ahogy azt a 35. ábra és 36. ábra is szemlélteti. Ahogy az ábrákon is látható az EKF működtetéséhez szükségünk van a cella feszültségére, a terhelési áramra, a cella hőmérsékletére, valamint egy 0 és 1 között tetszőlegesen megválasztható kiindulási SoC értékre. Emellett fontos, hogy definiáljuk a kezdeti állapotbecslési hiba kovarianciát, a feldolgozási zaj kovarianciát, valamint a mérési zaj kovarianciát.



35. ábra Kiterjesztett Kálmán szűrő SoC becsléshez (forrás: MATLAB/Simulink)



36. ábra A becsléshez felhasznált kiterjesztett Kálmán szűrő alapú SoC becselő

Az EKF alapú állapotbecsléshez szükséges az SoC számítására egy másik egyenlet bevezetése, amely a következő:

$$\frac{dSoC}{dt} = -\frac{i}{3600 \cdot Q} \quad (33)$$

Ezen kívül fontos az állapot-, a folyamat és a megfigyelési függvény meghatározása is, amelyek az általam a Li-ion akkumulátor megvalósításához használt 1RC modell esetében a következők:

Állapotfüggvény:

$$x = [SoC \quad U_1]^T \quad (34)$$

Folyamatfüggvény:

$$f(x, i) = \begin{bmatrix} -\frac{i}{3600 \cdot q_{nom}} \\ \frac{i}{C_1(SoC, T)} - \frac{U_1}{R_1(SoC, T) \cdot C_1(SoC, T)} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Megfigyelésifüggvény:

$$h(x, i) = U_0(SoC, T) - i \cdot R_0 - U_1 \quad (36)$$

AZ EKF egy minden lépésnél elvégzett linearizációra támaszkodik, hogy közelítse a nemlineáris rendszert. A linearizáció elvégzéséhez a rendszer minden lépésnél kiszámítja a következő Jacobi-mátrixokat:

$$F = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (37)$$

$$H = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (38)$$

Ezt követően egy diszkretizációs lépés következik, amelyet követően az akkumulátor SoC becsléséhez szükséges Jacobi-mátrixok a következők lesznek:

$$F_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-T_s}{R_1 \cdot C_1}} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$H_d = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_{open}}{\partial SoC} & -1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Ahogy az már korábban is említésre került a Kálmán-szűrés 3 különálló fázisból áll, amelyekhez a következők egyenletek kapcsolhatók:

1. Inicializálás:

$\hat{x}(0|0)$ – Állapotbecslés a 0. időlépésnél a 0. időlépéshez tartozó mérést felhasználva.

$\hat{P}(0|0)$ - Állapotbecslési hiba kovariancia (bizonytalanság) mátrix a 0. időlépésnél a 0. időlépéshez tartozó mérést felhasználva.

2. Becslés:

Az állapot előrevetítése:

$$\hat{x}(k+1|k) = f(\hat{x}(k|k), i) \quad (41)$$

A hiba kovariancia előrevetítése:

$$\hat{P}(k+1|k) = F_d(k) \cdot \hat{P}(k|k) \cdot F_d^T(k) + Q \quad (42)$$

3. Frissítés:

Kálmán-nyereség:

$$K(k+1) = \hat{P}(k+1|k) \cdot H_d^T(k) \cdot (H_d(k) \cdot \hat{P}(k+1|k) \cdot H_d^T(k) + R)^{-1} \quad (43)$$

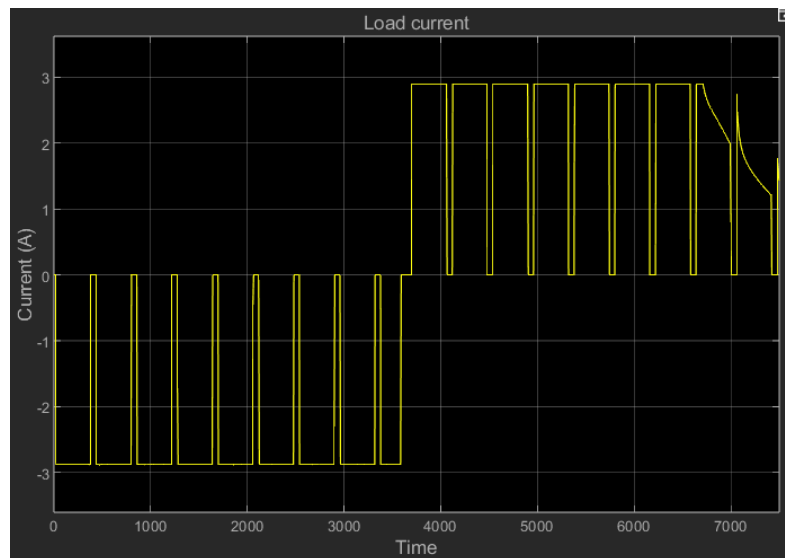
Az állapot frissítése a méréssel:

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1) \cdot (U_t(k) - h(\hat{x}(k|k), i)) \quad (44)$$

A hiba kovariancia frissítése:

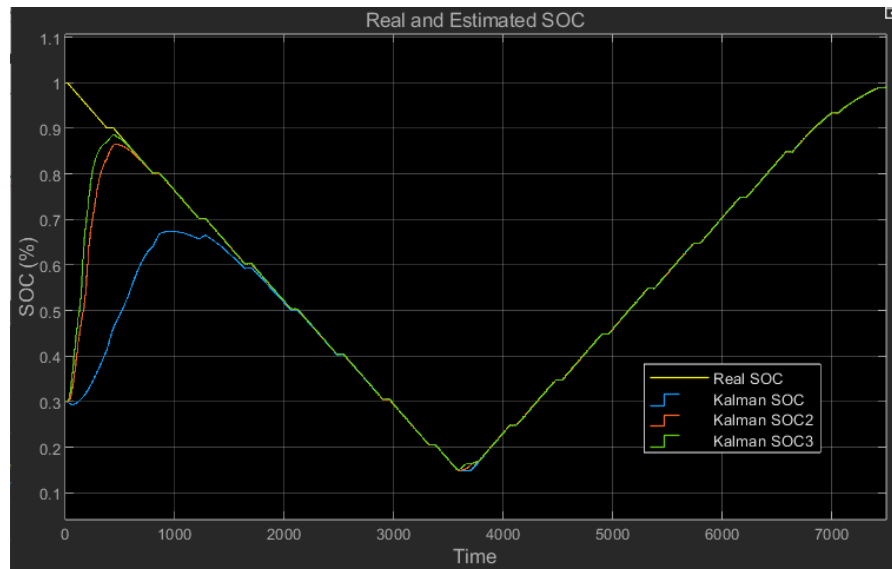
$$\hat{P}(k+1|k+1) = (I - K(k+1) \cdot H_d) \cdot \hat{P}(k+1|k) \quad (45)$$

Az EKF alapú SoC becslő működését ezt követően több mérési adatsor felhasználásával teszteltem. Ezek a mérési adatok egyrészt lehetővé tették, hogy finom hangoljam a Kálmán szűrő paramétereit másrészt pedig ismételten validálni tudtam az ECM modellem paraméterezését és működését. Ahogy a 37. ábra is mutatja a Kálmán-szűrő működésének teszteléséhez egy olyan terhelési áram karakterisztikát használtam, amely rendkívül hasonlít a tranziens tesztek során alkalmazottra és ezzel a terhelési árammal először mérítettem majd töltöttem a Li-ion akkumulátor cella modellem.



37. ábra Az SoC becsléshez alkalmazott terhelési áram

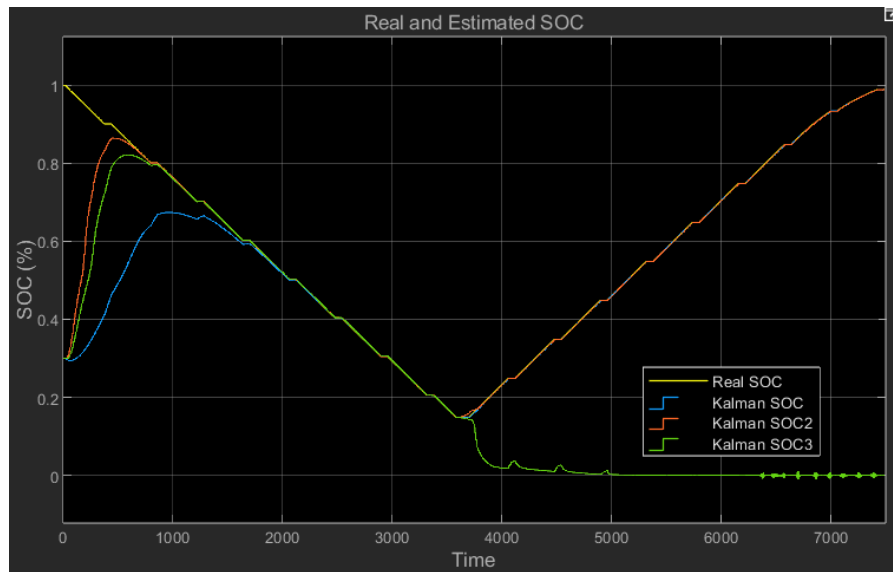
Mivel célom alapvetően az volt, hogy ne csak a Kálmán szűrő pontosságát, hanem a mért és a becsült érték közötti hiba kiküszöbölésének sebességét is megnézzem, ezért a kiindulási SoC értéket 0.3-nak választottam miközben a tényleges SoC érték 1-ről indult a mérítés során. Ahogy az a 38. ábrán is látható a valós SoC értéknek megfelelő becsült SoC értéket 3 különbözően parametrizált Kálmán szűrő segítségével igyekeztem elérni és ahogy az várható volt a 3 Kálmán szűrő által becsült SoC értékek rendkívül különböző sebességgel közelítették meg a valós SoC értéket.



38. ábra Valós és becsült SoC-k összehasonlítása

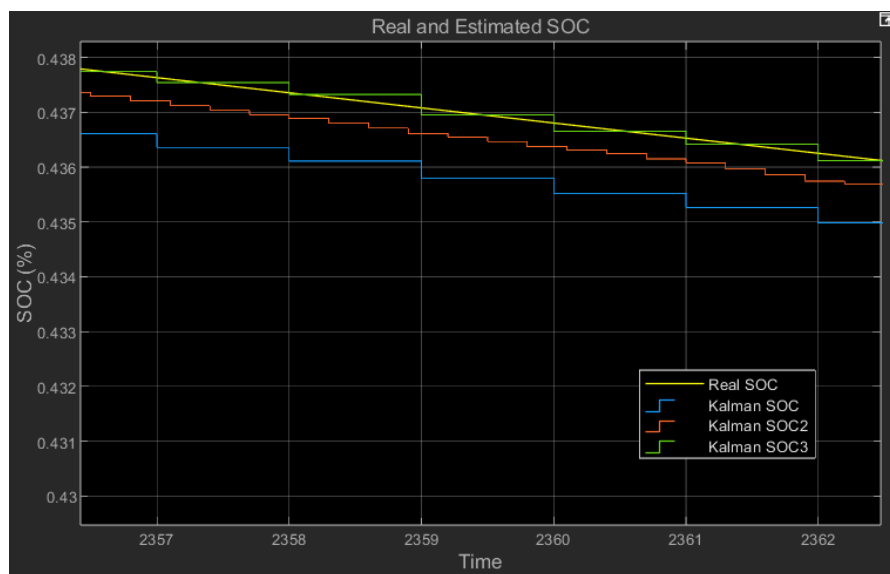
Dolgozatom során a kék színűvel jelzett Kálmán szűrő becslését tekintettem kiindulási állapotnak. A narancssárga színnel jelzett Kálmán szűrő valójában pontosan ugyanúgy lett felparaméterezve, mint a kiindulási állapot azonban ennél a Kálmán szűrőnél csökkentettem a mintavételezési időt és ezzel jelentősen megnőveltem az elvégzett becslések számát, amely jelentősen lassította a szimuláció futtatási idejét, így semmiképpen sem nevezhető optimális megoldásnak. A zöld színnel jelzett Kálmán szűrő esetében éppen ezért visszatértem az alapértelmezett mintavételezési időre és a szűrő reakció idejének javulását a kovariancia értékek finomhangolásával értem. Ahogy az az ábrán is látható ez a megoldás a legoptimálisabb, amennyiben a mintavételezési időt nem akarjuk vagy tudjuk növelni. Azonban ennél a módszernél a szimulációk használata rendkívül fontos ugyanis a paraméterek finomhangolása során a változtatások nem mindig a várt eredményt hozzák, így előfordulhat, hogy az algoritmus korrekciós ideje romlik vagy szélsőséges esetben nem is lesz képes megfelelően megbecsülni a keresett értéket, ahogy azt a 39. ábra is mutatja. Természetesen a

különbség kiküszöbölési idejének optimalizálására akár a két megoldás kombinálása is megoldást jelenthet.



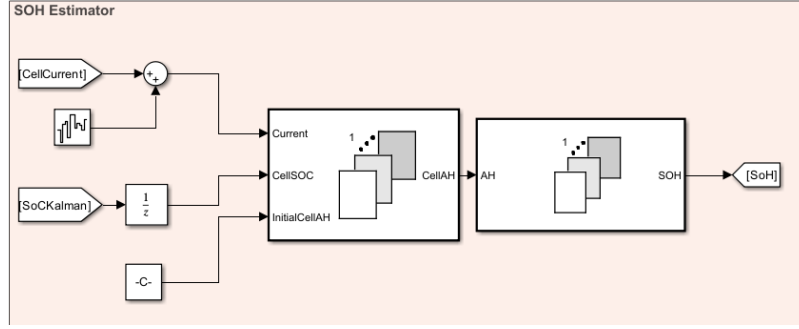
39. ábra Rosszul parametrizált Kálmán szűrő viselkedése

A 40. ábra azt a becslések közötti különbséget hivatott szemléltetni, amely a 38. és 39. ábrán nem látható. Az ábrán tökéletesen látható az is, hogy a második Kálmán szűrő esetében a mintavételezési idő csökkentésének következtében a szűrő által végzett becslések száma növekedett.



40. ábra Az egyes becslések összehasonlítása és az eltérések szemléltetése

Az SoC becslés megvalósítását követően a következő lépés az SoH becslés megvalósítása volt, amelyhez egy EKF alapú kapacitás becslőt, illetve egy kapacitás alapú SoH becslőt használtam fel, ahogy azt a 41. ábra is mutatja.



41. ábra Az SoH becslő modellje MATLAB/Simulink környezetben

Ahogy az az ábrán is jól látható az EKF alapú kapacitás becslő egyik bemenete az úgynevezett CellSOC egy SoC értéket vár ebből kifolyólag pedig ez a becslő remekül kombinálható az általam korábban ismertetett EKF alapú SoC becslővel, amit az általam alkalmazott bemeneti paraméter is jól szemléltet.

Az kapacitás becslő a Q -t tekinti a rendszer állapotfüggvényének még a folyamat- és megfigyelésfüggvénye a következő:

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad (46)$$

$$f(Q) = 0 \quad (47)$$

$$h(Q, SoC) = \frac{dSoC}{dt} + \frac{i}{3600 \cdot Q} \quad (48)$$

Ebből kifolyólag ennél a becslőnél a Jacobi-mátrixok a következőképpen alakulnak:

$$F = \frac{\partial f}{\partial Q} = 0 \quad (49)$$

$$H = \frac{\partial h}{\partial Q} = -\frac{i}{3600 \cdot Q^2} \quad (50)$$

A diszkretizációt követően az akkumulátor kapacitás becsléséhez szükséges Jacobi-mátrixok a következők:

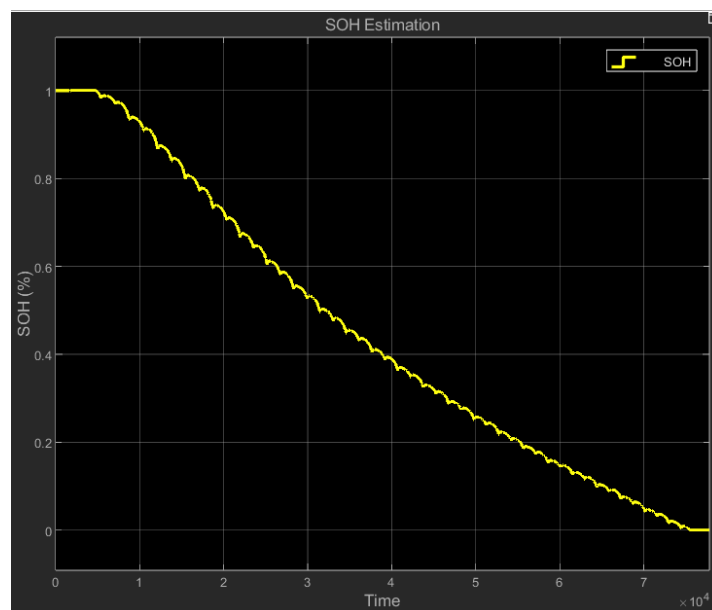
$$F_d = 1 \quad (51)$$

$$H = \frac{\partial h}{\partial Q} = -\frac{i}{3600 \cdot Q^2} \quad (52)$$

Az ezen értékek felhasználásával történő becslés eredményeként kapott kapacitás érték ezt követően felhasználható arra, hogy megbecsüljük az akkumulátor SoH értékét. A kapacitás alapú SoH becslő egy olyan becslést végez, amely megadja az akkumulátor SoH értékét a kapacitás csökkenés alapján. Ehhez pedig a következő egyenletet használja:

$$SoH = \frac{Q - Q_{eol}}{Q_{eol} - Q_n} \quad (53)$$

Az SoH értéke megadja az akkumulátor tényleges kapacitását a névleges kapacitáshoz viszonyítva. Ez azért rendkívül fontos, mert az akkumulátorban lejátszódó folyamatok következtében az akkumulátor teljesítménye és kapacitása folyamatosan csökken. Az akkumulátorok egészségének két fő indikátora az akkumulátor kapacitásának degradációja, illetve a belső ellenállás, amelyek felhasználásával szintén meghatározható az akkumulátor hátralévő szolgálati ideje. Fontos kiemelni, hogy különösen a komplexebb akkumulátor csomagok esetében az akkumulátoroknak két életciklusa van. Az elsődleges életciklusuk (például amikor egy elektromos gépjármű energia forrásaként szolgálnak) egészen addig tart ameddig a különböző degradációs folyamatok következtében SoH értékük nullára nem csökken, ami a gyakorlatban azt jelenti, hogy az akkumulátor maximális tényleges kapacitása a névleges érték 80%-ra csökken. Ennek az értéknek az elérésekor az akkumulátor elsődleges életciklusát letöltötte és cseréje szükségessé válik. Azonban az akkumulátor még más jellegű felhasználásra (például energiatárolóként) alkalmas és így újrahasznosítható lehet ezt tekintjük a cella másodlagos életciklusának, amely lehetővé teszi, hogy az akkumulátort nagyobb SoH csökkenésig felhasználjuk. Az általam választott applikáció esetében célom az elsődleges életciklus végének meghatározása volt, ahogyan azt a 42. ábra is szemlélteti.



42. ábra Az SoH becslő segítségével az elsődleges életciklus végének meghatározására

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban bemutattam az elektrokémiai cellákat, illetve azokat a tényezőket, amelyek befolyásolják a cellák és a belőlük készülő akkumulátorok élettartamát. Emellett elemeztem elkészítettem és felparametrizáltam egy olyan akkumulátor modellt, amely egy valódi Li-ion cella digitális ikrének tekinthető majd ennek a modellnek a felhasználásával elkészítettem egy EKF-re épülő SoC becslőt, valamint egy EKF alapú kapacitás becslésre épülő SoH becslőt is, amelyeket validáltam is.

Az elektrokémia cellák bemutatása alapján jól látható, hogy a méretéhez képest egy kifejezetten összetett eszközről beszélünk, amelyben nagy potenciál van. Azonban az is kiderült, hogy sok szempontból rendkívül érzékeny rendszerekről beszélünk, amelyek javítása vagy kicserélése költséges lehet éppen ezért fontos az optimális élettartamuk elérése.

Az élettartambefolyásoló tényezők bemutatása során éppen ezzel a kérdéssel foglalkoztam és rávilágítottam, hogy a Li-ion akkumulátorok élettartamát számos tényező befolyásolja. Ezekből vannak, olyan tényezők, amelyek a gyártótól függenek, mint a megfelelő tervezés és gyártási minőség, azonban számos olyan tényező is van, amelyek szinte csak az akkumulátor végfelhasználójától és az ő odafigyelésétől függenek, mint például a hőmérséklet és a DoD.

A Li-ion akkumulátor modellem megalkotása során egy olyan módszert választottam, amelynek segítségével az elkészült modell bármikor könnyedén átalakítható egy teljesen más típusú akkumulátor digitálisikrévé, illetve a modell pontossága is szükség esetén növelhető. Emellett a modellt úgy parametrizáltam fel, hogy az képes lekezelni az akkumulátor ciklikus öregedését, valamint a hőmérsékleti hatásokat is. Ezt követően pedig ennek a modellnek a felhasználásával létrehoztam egy SoC és egy SoH becslőt, amelyeknek működését validáltam is. A becslésekhez felhasznált EKF-ek alkalmazása során törekedtem arra, hogy elérjem az optimális sebességet és pontosságot, ahogyan azt a korábban bemutatott ábrám is igazolja.

Összeségében elmondható, hogy az általam létrehozott akkumulátor modell és EKF alapú becslési rendszer kiválóan alkalmas arra, hogy egy valós Li-ion akkumulátor működését szimulálja és annak SoC és SoH értékéről megbízható becslést adjon.

Jövőbeli célom a modell további finomítása többek között a parametrizálási eljárás finomításával, nagyobb méretű mérési adatsorok felhasználásával, illetve további élettartam befolyásoló tényezők modellbe integrálásával. Emellett célom további becslési módszerek integrálása a modellbe majd ezek összehasonlítása.

8. IRODALOMJEGYZÉK

1. Isidor Buchmann (2016): *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, Cadex Electronics Inc.
2. Kai Peter Birke (2019): *Modern Battery Engineering: A Comprehensive Introduction*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
3. Baba Mulani (2023): *Lithium-Ion Batteries : Foundational and Practical Insight*, Independently published
4. Helena Berg (2015): *Batteries for Electric Vehicles: Materials and Electrochemistry*, Cambridge University Press
5. Laure Monconduit, Laurence Croguennec (2018): *Prospects For Li-ion Batteries And Emerging Energy Electrochemical Systems (Series On Chemistry, Energy And The Environment)*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
6. Albert N. Link, Alan C. O'Connor, and Troy J. Scott (2015): *Battery Technology for Electric Vehicles: Public science and private innovation*, Routledge
7. <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-lithium-polymer-batteries-faq/> (2024.02.10.)
8. <https://www.techsciresearch.com/blog/manufacturing-lithium-ion-batteries/29.html> (2024.02.10.)
9. Miao Y, Hynan P, von Jouanne A, Yokochi A. (2019): *Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements*. *Energies*. 12(6):1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
10. <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/> (2024.02.15.)
11. <https://www.flashbattery.tech/en/lithium-battery-transport/> (2023.10.15)
12. Yuqing Chen, Yuqiong Kang, Yun Zhao, Li Wang, Jilei Liu, Yanxi Li, Zheng Liang, Xiangming He, Xing Li, Naser Tavajohi, Baohua Li (2021): *A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards*, *Journal of Energy Chemistry*, Volume 59, Pages 83-99, <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
13. https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems#electric_vehicle_cooling_systems (2024.02.16)
14. <https://www.elastoproxy.com/ice-vehicles-vs-electric-vehicles/> (2024.02.16)
15. Ibham Veza, Muhammad Zacky Asy'ari, M. Idris, Vorathin Epin, I.M. Rizwanul Fattah, Martin Spraggon (2023): *Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by*

- 2050 from EV, Alexandria Engineering Journal, Volume 82, Pages 459-467, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.020>.
16. <https://article.murata.com/en-sg/article/basic-lithium-ion-battery-2> (2024.02.18.)
 17. Frith, J.T., Lacey, M.J. & Ulissi, U. (2023): *A non-academic perspective on the future of lithium-based batteries*, Nat Commun 14, 420 <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35933-2>
 18. Naoki Nitta, Feixiang Wu, Jung Tae Lee, Gleb Yushin (2015): Li-ion battery materials: present and future, Materials Today, Volume 18, Issue 5, Pages 252-264, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
 19. Leng, F., Tan, C. & Pecht, M. (2015): Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. Sci Rep 5, 12967, <https://doi.org/10.1038/srep12967>
 20. Kai Liu, Yayuan Liu, Dingchang Lin, Allen Pei, Yi Cui (2018): *Materials for lithium-ion battery safety*, SCIENCE ADVANCES, Vol 4, Issue 6, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9820>
 21. <https://www.greentechrenewables.com/article/how-does-temperature-affect-battery-performance> (2024.02.20)
 22. Li, Xueguang; Jiang, Haizhou; Guo, Sufen; Xu, Jingxiu; Li, Meiyan; Liu, Xiaoyan; Zhang, Xusong (2022): *SOC Estimation of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Based on Deep Multilayer Perceptron*, Computational Intelligence and Neuroscience, <https://doi.org/10.1155/2022/3920317>
 23. Matúš Danko, Juraj Adamec, Michal Taraba, Peter Drgona (2019): *Overview of batteries State of Charge estimation methods*, Transportation Research Procedia, Volume 40, Pages 186-192, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.029>
 24. Zuolu Wang, Guojin Feng, Dong Zhen, Fengshou Gu, Andrew Ball (2021): *A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles*, Energy Reports, Volume 7, Pages 5141-5161, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.113>
 25. Srinivas Singirikonda and Y P Obulesu (2020): *Battery modelling and state of charge estimation methods for Energy Management in Electric Vehicle-A review*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 937 012046, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012046>
 26. Jia Guo et al (2022): *The Influence and Degradation Mechanism of the Depth of Discharge on the Performance of NMC-Based Cathodes for Li-Ion Batteries*, Meet. Abstr. MA2022-01 252, <https://doi.org/10.1149/MA2022-012252mtgabs>

27. Jia Guo et al (2022): *The Influence and Degradation Mechanism of the Depth of Discharge on the Performance of NMC-Based Cathodes for Li-Ion Batteries*, Meet. Abstr. MA2022-01 252, <https://doi.org/10.1149/MA2022-012252mtgabs>
28. Roby Gauthier et al (2022): *How do Depth of Discharge, C-rate and Calendar Age Affect Capacity Retention, Impedance Growth, the Electrodes, and the Electrolyte in Li-Ion Cells?*, J. Electrochem. Soc. 169 020518, <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac4b82>
29. Xu, Bolun & Oudalov, Alexandre & Ulbig, Andreas & Andersson, Göran & Kirschen, D.s. (2016): *Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment*, IEEE Transactions on Smart Grid, 99, 1-1, <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>
30. Wikner, Evelina, and Torbjörn Thiringer (2018): *Extending Battery Lifetime by Avoiding High SOC*, Applied Sciences 8, no. 10: 1825. <https://doi.org/10.3390/app8101825>
31. <https://www.mpoweruk.com/life.htm> (2024.02.25.)
32. <https://www.kiavictoria.ca/seven-biggest-mistakes-people-make-with-their-ev-battery-that-will-cost-you/> (2024.02.25.)
33. Rui Xiong, Yue Pan, Weixiang Shen, Hailong Li, Fengchun Sun (2020): *Lithium-ion battery aging mechanisms and diagnosis method for automotive applications: Recent advances and perspectives*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 131, 110048, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110048>
34. <https://www.thermofisher.com/blog/ask-a-scientist/challenges-in-lithium-ion-battery-manufacturing-and-quality-analysis-part-1/> (2024.02.25.)
35. Joscha Schnell, Gunther Reinhart (2016): *Quality Management for Battery Production: A Quality Gate Concept*, Procedia CIRP, Volume 57, Pages 568-573, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.098>
36. Yuksel, Tugce; Michalek, Jeremy J. (2015): *Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Emissions in the United States*, Environmental Science & Technology, volume 49, issue 6, page 3974-3980, <https://doi.org/10.1021/es505621s>
37. <https://pluginncc.com/charging-101> (2024.02.26.)
38. Fabio Widmer, Andreas Ritter, Pol Duhr, Christopher H. Onder (2022): *Battery lifetime extension through optimal design and control of traction and heating systems in hybrid drivetrains*, eTransportation, Volume 14, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100196>.
39. <https://www.mathworks.com/discovery/battery-pack-design.html> (2024.02.26.)
40. <https://www.dnkpowers.com/li-ion-bms/> (2024.02.27.)
41. Wikner, Evelina, and Torbjörn Thiringer (2018): *Extending Battery Lifetime by Avoiding High SOC*, Applied Sciences 8, no. 10: 1825. <https://doi.org/10.3390/app8101825>

42. Fabio Widmer, Andreas Ritter, Pol Duhr, Christopher H. Onder (2022): *Battery lifetime extension through optimal design and control of traction and heating systems in hybrid drivetrains*, eTransportation, Volume 14, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100196>.
43. <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/batterytablebased.html>
44. Jiaping Zhou, Bo Xing, Chunyang Wang (2020): A review of lithium ion batteries electrochemical models for electric vehicles, E3S Web Conf. 185 04001, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018504001>
45. He, Wei, Michael Pecht, David Flynn, Fateme Dinmohammadi (2018): *A Physics-Based Electrochemical Model for Lithium-Ion Battery State-of-Charge Estimation Solved by an Optimised Projection-Based Method and Moving-Window Filtering*, Energies, Volume 11, <https://doi.org/10.3390/en11082120>
46. Kailong Liu, Yizhao Gao, Chong Zhu, Kang Li, Minrui Fei, Chen Peng, Xi Zhang, Qing-Long Han (2022): Electrochemical modeling and parameterization towards control-oriented management of lithium-ion batteries, Control Engineering Practice, Volume 124, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105176>
47. Kim Woo-Yong, Lee Pyeong-Yeon, Kim Jonghoon (2019): *A Nonlinear-Model-Based Observer for a State-of-Charge Estimation of a Lithium-Ion Battery in Electric Vehicles*, Energies, Volume 12, <https://doi.org/10.3390/en12173383>
48. M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, A. Hussain, A. Mohamed (2017): *A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 78, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>
49. Surya Sumukh, Channegowda Janamejaya, Datar Shantanu, Jha Abhay, Victor Ashita. (2020): *Accurate Battery Modeling Based on Pulse Charging using MATLAB / Simulink*, <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379617>
50. Rajanna B V, Kumar M (2020): *Comparison of one and two time constant models for lithium ion battery*, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 10, <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i1.pp670-680>
51. Thakkar, Rushali (2021): *Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery*, Energy Storage Devices, <https://doi.org/10.5772/intechopen.99851>
52. <https://iee-dataport.org/open-access/complex-testing-procedure-18650-batteries> (2024.03.01.)
53. <https://www.mathworks.com/help/slido/ug/optimization-problem-formulation-for-parameter-estimation.html> (2024.03.01.)

54. <https://www.mathworks.com/help/slido/ug/speedup-param-est-using-parallel-computing.html> (2024.03.01.)
55. Thoma A, Moni A, Ravi S (2021): *Significance of Parallel Computing on the Performance of Digital Image Correlation Algorithms in MATLAB*, Designs, <https://doi.org/10.3390/designs5010015>
56. Szymczyk, Magdalena; Szymczyk, Piotr (2012): *Matlab and Parallel Computing*, Image Processing & Communications, <https://doi.org/10.2478/v10248-012-0048-5>
57. <https://www.mathworks.com/help/simscape-battery/> (2024.03.01.)
58. <https://www.kalmanfilter.net/multiSummary.html> (2024.03.01.)
59. Shi Shuaiwei, Zhang Minshu, Lu Mi, Wu Changfeng, Cai Xiang (2024): *State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on Extended Kalman Particle Filter and Orthogonal Optimized Battery Model*, Advanced Theory and Simulations, <https://doi.org/10.1002/adts.202301022>
60. Xie Jiamiao, Wei Xingyu, Bo Xiqiao, Zhang Peng, Chen Pengyun, Hao Wenqian, Yuan Mei-ni (2023): *State of charge estimation of lithium-ion battery based on extended Kalman filter algorithm*, Frontiers in Energy Research, Volume 11, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1180881>
61. Zhang Ruoyuan, Zhang hailong (2023): *Extended Kalman Filter-Based SOC Estimation for Lithium Battery Packs*, E3S Web of Conferences, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340602040>