

Lítium akkumulátor modellezése Simulink környezetben

Hajdu Flóra*, Dr. Lakatos István. Phd**, Kőrös Péter***

*SZE, Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék (e-mail: h12flora@t-online.hu)

**SZE, Közúti és Vasúti Járművek Tanszék, (e-mail: lakatos@sze.hu)

*** SZE, Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék (e-mail: korosp@sze.hu)

Absztrakt: A kutatás célja elektromos járművekben alkalmazható lítium akkumulátor Simulink modelljének megvalósítása volt. A modellnek köszönhetően jelentős megtakarítást érhetünk el, hiszen nem kell drága akkumulátor csomagokat beszerezni a vizsgált járműbe, elegendő néhány cella megvásárlása, amelyek szimuláció segítségével tudunk következtetni az akkumulátor viselkedésére, illetve az adott járműben való alkalmazhatóságára. A cikk irodalomkutatás alapján összefoglalja a modellezési lehetőségeket, valamint a modell megvalósítását Simulink környezetben. Foglalkozik a többváltozós paraméterek implementálásával is. Egy újszerű, a Peukert effektus hatását figyelembe vevő akkumulátor modellt is ismertet, valamint kitér a modellek validálására, a szükséges paraméterek meghatározására mérési eredmények alapján.

1. BEVEZETÉS

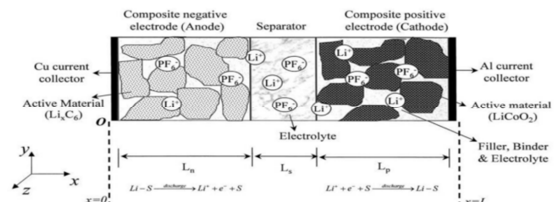
A lítium akkumulátorok modellezése nem egyszerű feladat. A pontos elméleti modell ugyanis algebrai hurok miatt nem valósítható meg a szimulációkban [18.], ezért minden modell egyszerűsít az alkalmazási céloknak megfelelően.

További nehézséget okoz, hogy a legtöbb akkumulátor modell vagy nagyon bonyolult elektrokémiai egyenleteket tartalmaz, vagy empirikus és a pontos kisütési görbéket mérési eredmények alapján határozta meg. Számos akkumulátor modell létezik, lásd Knauff cikkében is [11.]: „The available models differ in both complexity and in the nature of the tests necessary to implement the models” (a lehetséges modellek komplexitásában és a megvalósításukhoz szükséges tesztekben-vizsgálatokban különböznek).

2. AKKUMULÁTOR MODELLEZÉSI LEHETŐSÉGEI

Az **elektrokémiai** modellek [19.] a legpontosabb létező modellek, de bonyolult parciális differenciálegyenleteket tartalmaznak, így nagy a szimuláció futási időigénye.

A **matematikai** modellek nagyon elvontak, specifikusak és pontatlanok is (10-15%-os relatív hiba). **Gomadani, Weidner, Dougal és White** ismertetnek egy lehetséges matematikai-elektrokémiai modellt, amely az elektróda részecske viselkedéséből indul ki [9.]. A matematikai modellekkel ellentétben a modell általános és sok akkumulátor típusra alkalmazható (ez előny is lehet). Elvi vázlat az 1. ábrán látható.



1. ábra: A matematikai-elektrokémiai modell elvi vázlata

Az **áramköri** modell az akkumulátort egyszerű áramköri elemekkel modellezi. Pontossága a matematikai és az elektrokémiai modellek között van (1-5%-os hiba), de sokkal jobban kezelhető, könnyebben átlátható és megvalósítható a különböző szimulációs szoftverekkel (pl. SPICE [10.]). Ennek a modellnek több fajtája is van [4.]: A továbbiakban ezek irodalmi áttekintését végezzük el.

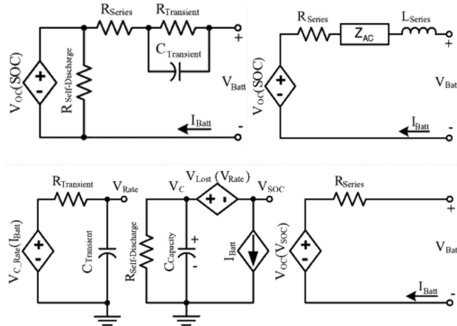
2.1 Áramköri akkumulátor modellek

A **Thevenin alapú modell** egy soros ellenállásból és egy RC körből áll, amely a transziens jelenségekért felelős. Az akkumulátor választ adja transziens jelenségekre meghatározott töltöttségi szintnél (a továbbiakban SOC, azaz State of charge). Feltételezi, hogy a nyitott áramköri feszültség konstans. Előnye, hogy ez a legegyszerűbb áramköri modell. Hátránya, hogy nem lehet vele sem állandó terhelést, sem a futásidőt vizsgálni. Ki lehet ugyan bővíteni úgy, hogy tudja kezelni az előbb említett jelenségeket is, de ez már jelentősen bonyolítja a modellt (változó kapacitás, matematikai egyenletek stb.).

Az **impedancia alapú modellek** az impedancia spektroszkópia elvén egy AC ekvivalens modellt hoznak létre a frekvencia tartományban. Az átalakítás bonyolult, komplex

és nem intuitív. További probléma, hogy csak meghatározott töltöttségi szinten (SOC-nál) és hőmérsékleten működőképes.

Az **üzemidő alapú modellek** komplex áramkörrel szimulálják az akkumulátor egyenáramú terhelését és üzemidejét. Hátrányuk, hogy változó terhelés esetén nagyon pontatlanok.



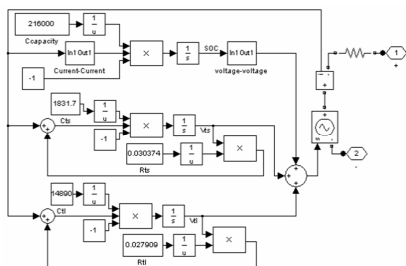
2. ábra: Áramköri modellek (fent balra Thevenin, fent jobbra impedancia, lent üzemidő alapú) [4.]

Chen és Rincón-Mora a Thevenin és a futásidő alapú modellek kombinálásából indultak ki [4.]. A modell két áramkörből áll:

- a. kapacitív rész, amely az akkumulátor üzemidejéért felelős
- b. ún. Thevenin rész, amely az akkumulátor dinamikus viselkedését írja le.

Egyszerűsítéseket visz be az önkisütés, a ciklusszám és a hőmérséklet hatások figyelembe vételénél. A modellt azonban egyszerűen kibővíthetjük ezekkel a jelenségekkel. Mérésekkel validálva bármely akkumulátor esetén alkalmazható. **Bővíthetősége és egyszerűsége miatt több, elsősorban hibrid járművekben alkalmazható akkumulátor modellnek is ez volt az alapja.**

Knauff cikkében olvashatunk egy alap Simulink blokkokkal megvalósítható akkumulátor modellről [11.]. Pilóta nélküli hibrid járművek teljesítmény és meghajtás tesztelésére készítették a NAVSEA-ban. Ez a modell is Chen és Rincón-Mora modelljéből [4.] indult ki. Az áramköri elemek kapcsolatát mérésekkel határozták meg, amelyet a Simulink lookup table blokkjával valósítottak meg a modellben. Az abszolút hiba így 0,19% volt.



3. ábra: Akkumulátor modell alap Simulink blokkokkal [11.]

Tremblay, Dessaint és Dekkiche cikke ismerteti a Simulinkba beépített akkumulátor modell elvi felépítését [18.]. Ez egy általános modell a népszerű akkumulátorok reprezentálására. Több helyen is egyszerűsít, például a belső ellenállást konstansnak veszi (a valóságban nem az) és a töltést inverz kisütésként kezeli. A modell előnye, hogy már létezik és van hozzá demó is, hátránya, hogy nehezen bővíthető, alakítható. Alkalmazása abban az esetben előnyös, ha az alkalmazás fontosabb, mint maga az akkumulátor modell.

Gao, Liu és Dougal dinamikus akkumulátor modellt valósítottak meg mobil telefon akkumulátorokhoz [8.]. A modell a gyártó által meghatározott adatlapokból indul ki. Felépítése komplexebb, mint az előbb említett áramköri modelleké, hiszen figyelembe veszi a nemlineáris egyensúlyi potenciált, a hőmérsékleti hatásokat és a tranziens választ is, de nem megy bele a bonyolult elektrokémiai folyamatokba és könnyen bővíthető. Ugyanakkor hátránya, hogy a modell elsősorban kis méretű akkumulátorokhoz alkalmazható, nagy teljesítményű alkalmazásokhoz ki kell egészíteni.

3. AKKUMULÁTOR MODELLEZÉSI ELV KIVÁLASZTÁSA

Esetünkben a cél elektromos meghajtású autó akkumulátorának modellezése volt, ahol nagy teljesítmények is felléphetnek, ezért végül a Knauff modelljéből indultunk ki egyszerűsége, jó alkalmazhatósága és bővíthetősége miatt.

2.1. Az akkumulátor modell alapjai (Knauff szerint)

Az akkumulátor viselkedését leíró egyenletek (1.)-(2.):

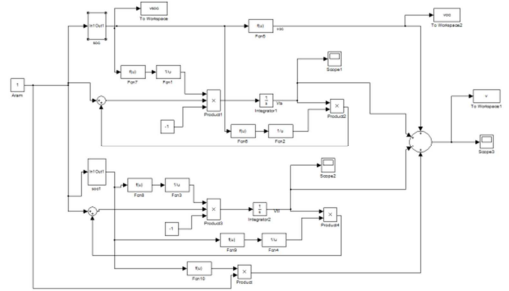
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(R_{12} C_{12})^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -(R_{long} C_{long})^{-1} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -C_{cap}^{-1} \\ -C_{12}^{-1} \\ -C_{long}^{-1} \end{bmatrix} u \quad (1.)$$

$$y = g(x_1) + x_2 + x_3 + R_{01}u \quad (2.)$$

Ahol:

- C_{12} , és C_{long} a tranziens RC körök kapacitásai
- R_{12} , R_{long} a tranziens RC körök ellenállásai
- C_{cap} az akkumulátor teljes kapacitása
- R_{01} a belső ellenállás
- $g(x)$ a SOC (state of charge, azaz töltöttségi szint) és a nyitott áramköri feszültség (VOC) közötti nemlineáris kapcsolatot írja le
- X állapotvektor az RC körök kimenő feszültsége
- a bemenet u az akkumulátorba belépő áram
- a kimenet y az akkumulátor sarkain mérhető feszültség

(1.) és (2.) képletek alapján Simulink környezetben megalkottuk az alapmodellünket, amelynek felépítése a 4. ábrán látható.



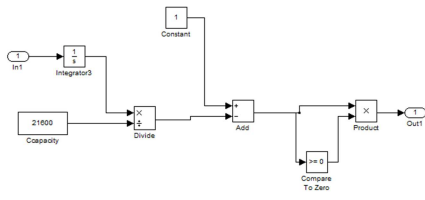
4. ábra: Kezdeti akkumulátor modell

Mivel minden paraméter (ellenállások és a VOC) a SOC függvénye ezért az egyszerűbb kezelhetőség érdekében SOC modellezésére külön alrendszert hoztunk létre.

Az alrendszer kimeneti értéke egy 0 és 1 közötti szám. A paraméterek változását ennek az értéknek a függvényében adtuk meg function blokk segítségével. Az SOC blokk működését leíró egyenlet (3.) [11.]:

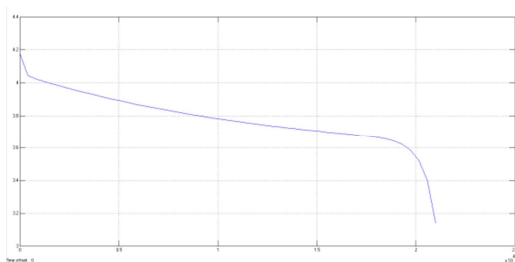
$$v_{soc}(t) = v_{SOC}(0) - \frac{1}{C_{Cap}} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (3.)$$

A SOC alrendszer blokkdiagramja az 5. ábrán látható.



5. ábra: SOC modellezése

A kapacitás értékét eleinte Coulombban adtuk meg, a későbbi modellben azonban már a használatosabb Ah-ban adott értéket lehetett megadni és a Simulink számolta át ezeket a megfelelő értékre. A paraméterek értékét az SOC függvényében első körben a szakirodalomból [4.] vettük át. A feszültség-idő diagram a 6. ábrán látható.



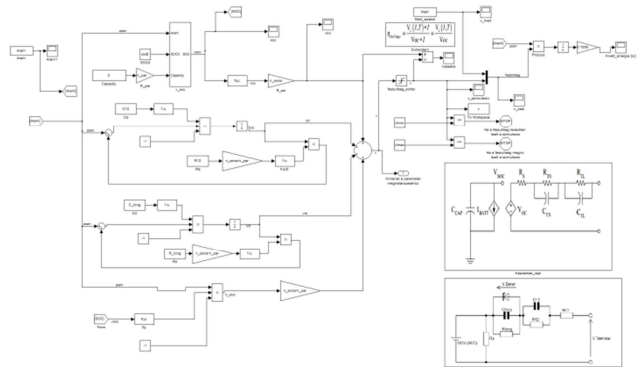
6. ábra: A feszültség-idő diagram

A feszültség-idő diagram jellegre hasonlít az elméleti diagramhoz, tehát a modell működése elvileg megfelelő. Mindazonáltal az átvett képleteket egy 850 mAh-s akkumulátorhoz határozták meg, a mi akkumulátoraink azonban ennél lényegesen nagyobb kapacitással rendelkeznek. A modell validálásához a szükséges paramétereket mérések alapján határozhatjuk meg a kívánt akkumulátor típusra.

4. A THUNDERSKY 40 AH AKKUMULÁTOR MODELLEJE 0,5C TERHELÉS ESETÉN

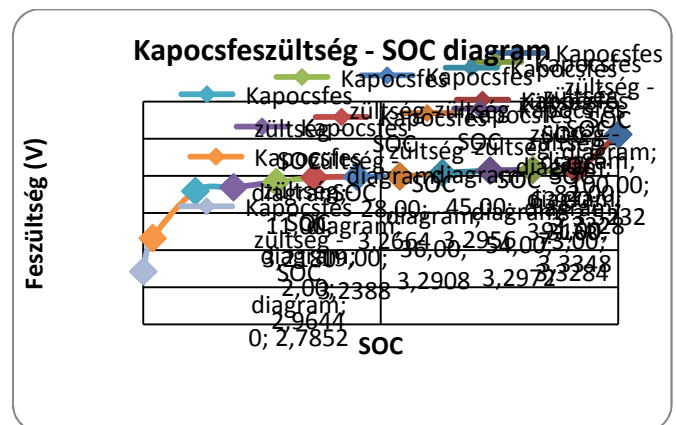
4.1. Paraméterek meghatározása

A hibrid járművekkel foglalkozó akkumulátor modellek empirikusan, azaz mérések alapján határozzák meg a modell paramétereit. Az első modellhez a Thundersky 40 Ah-s akkumulátor méréseit vettük alapul 0,5 C kisütő áramnál. A paraméterek meghatározásához a Simulink modellt ki kellett bővíteni.



7. ábra: Akkumulátor modell

Több módszer is létezik a SOC-VOC diagram meghatározására [14.,1.], mi az Ah számolás módszerét alkalmaztuk a VOC meghatározására. VOC értékét megmértük úgy, hogy minden 10% SOC csökkenés után hagytuk, hogy a feszültség visszakússzon. A nyitott áramköri feszültség-idő diagram a 8. ábrán látható.



8. ábra: A kapocsfeszültség-idő diagram Thundersky 40Ah akkumulátornál (saját mérés alapján)

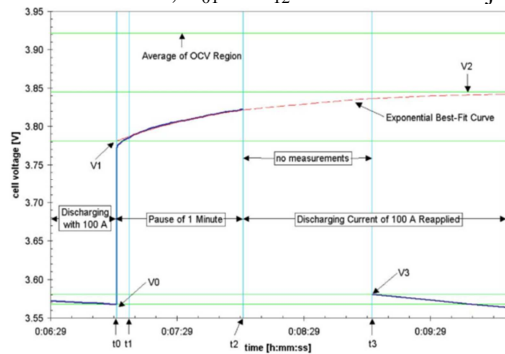
A VOC-SOC görbe egyenletét Matlab Curve Fitting Toolbox segítségével határoztuk meg.

$$VOC(SOC) = \frac{(a + b \cdot SOC + c \cdot SOC^2)}{(d + e \cdot SOC + f \cdot SOC^2)} \quad (4.)$$

Az együtthatók értékei: $a=0,05317$, $b=1,515$, $c=-1,545$, $d=0,0191$, $e=0,4499$, $f=-0,4624$.

(4.) képletet más akkumulátorokhoz is felhasználhatjuk, csak az együtthatók fognak változni. Emiatt a változókat, valamint a konstans paramétereket (kapacitás, kiinduló SOC) egy Matlab Script segítségével adtuk meg, amelyet bármikor egyszerűen módosíthatunk.

Az ellenállások értékeinek a meghatározásához **Abu-Sharkh** és **Doerffel** méréseit vettük alapul [1.]. A kapacitások meghatározásával most nem foglalkoztunk, hatásuk a dinamikai terheléseknél lesz jelentős. A paraméterek közül ezzel a méréssel VOC, R_{01} és R_{12} értékét határozhatjuk meg.



9. ábra: Az ellenállások értékeinek kiszámításához szükséges feszültségértékek [1.]

A visszakúszási jelenségből lehet az ellenállások értékét számolni.

$$R_{01} = \frac{V_1 - V_0}{|I|} \quad (5.)$$

$$R_{12} = \frac{V_2 - V_1}{|I|} \quad (6.)$$

Hasonlóan a VOC-SOC diagramhoz itt is a Matlab Curve Fitting Toolbox segítségével határoztuk meg a függvényt.

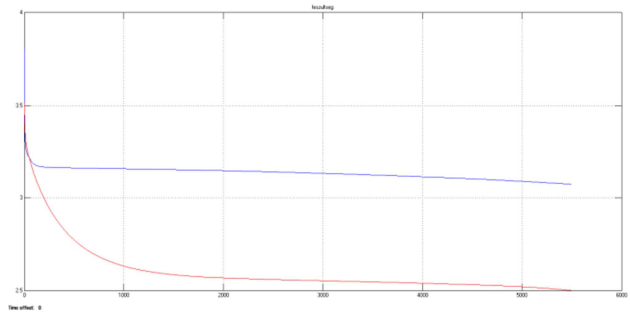
$$R_{01} = -0,0011 SOC^2 + 0,0003 SOC + 0,0042$$

R_{12} értékét kezdetben szintén függvényként határoztuk meg, de a modell egyszerűsítése miatt végül konstansként adtuk meg [11.], értéke: $R_{12}=0,00387 \Omega$.

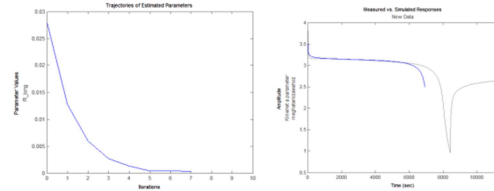
Az általunk ismert szakirodalmakban csak a belső ellenállás értékét mérték meg és a többi paraméter értékét matematikailag határozták meg. Benger cikkje [3.] utal arra, hogy lehetséges R_{long} és C_{long} értékének a meghatározása is

mérések alapján, de ez a folyamat nagyon költséges. Léteznek numerikus módszerek, mint pl. az Extended Kalman Filter (EKF) [22.,13.], illetve görbeillesztés segítségével is meg lehet meghatározni a paramétereket [11., 21.].

Mi egy harmadik lehetőséget, a **Simulink parameter estimation toolbox**-ot választottuk [5.]. R_{long} értékét kezdetben $R_{long}=0,027909 \Omega$ -ra vettük a szakirodalom [11.] alapján. A mérési eredményeket beolvastuk Simulinkba. A feszültség-idő diagram a paraméter meghatározás előtti állapota a 10. ábrán látható.

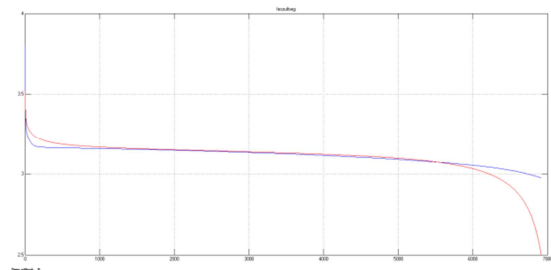


10. ábra: A feszültség-idő diagram a paraméterek meghatározása előtt (piros szimulációs, kék a mérési görbe)



11. ábra: R_{long} értékének meghatározása Simulink parameter estimation toolbox segítségével

R_{long} értéke így $0,00034522 \Omega$ lett. Az ezzel számolt feszültség-idő diagram a 12. ábrán látható.



12. ábra: A feszültség-idő diagram R_{long} értékének meghatározása után

A diagramból látható, hogy a feszültség viszonylag jól közelíti a mért görbét. Ugyanakkor a szimulációban hamarabb lemerül az akkumulátor, mint a valóságban. Ennek kiküszöbölésére a modellbe implementáltuk a Peukert jelenséget.

4.2. Peukert effektus figyelembe vétele

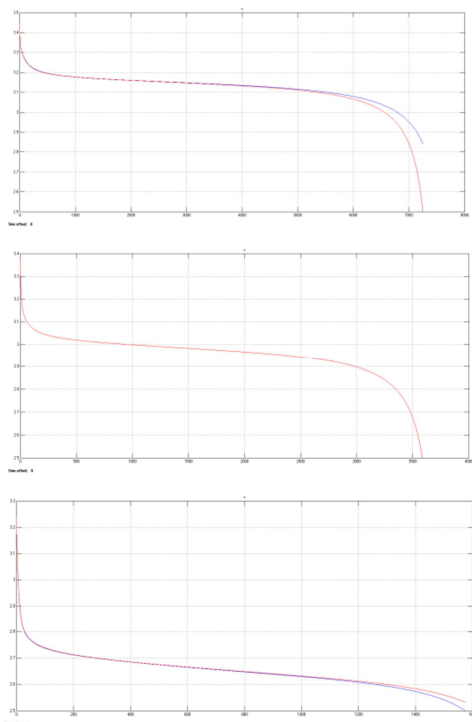
Ha egy akkumulátort kisütünk, akkor fele akkora kisütő áram hatására (0,5 C) nem kétszer annyi idő alatt merül le, hanem

valamivel hosszabb idő alatt. Ennek oka az akkumulátoron kisütéskor fellépő ellenállás változás [16.], a jelenséget Peukert effektusnak nevezzük. A Peukert effektus hatására különböző kisütő áram esetén más lesz a maximálisan kivehető kapacitás mennyisége. Az általunk használt egyenlet (7.) [6.]:

$$C_{n1} = C_n \left(\frac{I_n}{I_{n1}} \right)^{pc-1} \quad (7.)$$

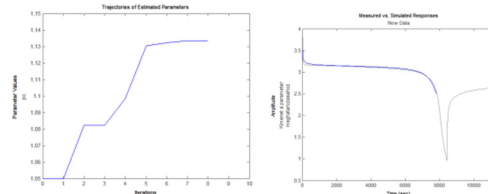
A képletben C_n a névleges kapacitás, I_n a névleges áram, I_{n1} az aktuális kisütő áram, C_{n1} az adott kisütő áramnál kivehető kapacitás és pc a Peukert konstans, értéke lítium akkumulátoroknál 1,05 [7.]. A Peukert effektust a SOC alrendszerbe építettük be.

A Peukert effektus hatását a modellben vizsgáltuk. A 13. ábrán látható a feszültség-idő és a SOC-idő diagramok láthatók 0,5C, 1C és 2C terheléskor. Az eredményeket összehasonlítottuk azokkal a diagramokkal, amikor nem volt Peukert effektus (a diagramokon a piros a Peukert effektus nélküli, a kék a Peukert effektust figyelembe vevő modell).



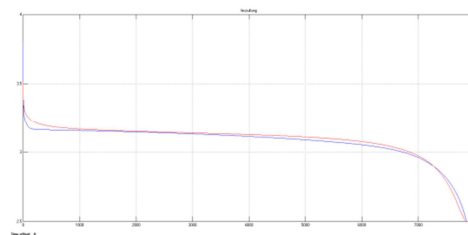
13. ábra: Feszültség-idő diagram 0,5 C (fent), 1C (középen) és 2C (lent) terheléseknél (kék a Peukert effektust figyelembe vevő modell)

A diagramokból látható, hogy a Peukert effektus hatására a modellünk valóságnak megfelelőbben működik, a kisütő áram hatására változik a kivehető kapacitás értéke. A Peukert effektus értékét is meghatároztuk Simulink parameter estimation toolbox segítségével. A kiinduló érték a szakirodalomban [7.] található konstans volt.



14. ábra: A Peukert konstans értékének meghatározása Simulink Parameter Estimation Toolbox segítségével

Új értéke: 1,1335. Az így kapott feszültség-idő diagram a 15. ábrán látható.



15. ábra: Feszültség-idő diagram a paraméterek meghatározása után

A diagramból látható, hogy a szimulációs görbe most már jól közelíti a mérési eredményeket. Jelentősebb eltérés leginkább a görbe elején, a kisütési ciklus kezdetén tapasztalható. A méréseink nem voltak automatizálva, ennek ellenére a modell pontosan közelítette a mérési diagramot. Pontosabb, automatizált mérésekkel lehetőségünk lesz pontos, egyszerűen változtatható modellt megvalósítására. Célunk az, hogy többváltozós paraméterek helyett a Peukert effektus értékét változtatnánk különféle terhelési esetekre (tehát csak egyetlen paraméter értéke változna). Ez jelentősen meggyorsítaná a munkát, hiszen nem kellene új akkumulátornál minden esetre megmérni az ellenállások értékét, elegendő lenne ezt a műveletet csupán egy-két terhelésre elvégezni.

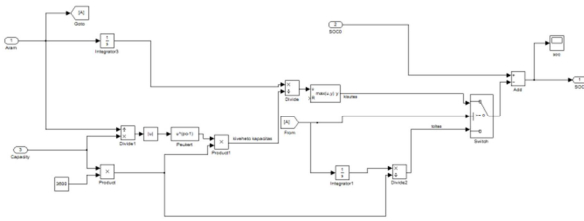
4.2. A Töltés

Akkumulátor modellezésénél lényeges dolog a töltést implementálása. A töltést az alapmodell is képes volt kezelni, mégpedig inverz kisütésként. A valóságban azonban töltéskor és kisütéskor más jelenségek játszódnak le, így mások az akkumulátor karakterisztikái is. A töltés és kisütés közötti váltás switch blokk segítségével valósítható meg, amely az SOC alrendszerbe implementálható. Az SOC változását kisütéskor és töltéskor az alábbi egyenlet írja le [12.] (8.).

$$SOC = \begin{cases} \frac{I_{bat} T_s}{C \cdot 3600} \left(\frac{I_{bat}}{I} \right)^{n(LC, t^o)-1} & ha I > 1 \\ - Eff(I_{bat}, t^o, LC) \int I_{bat} dt & ha I < 1 \end{cases} \quad (8.)$$

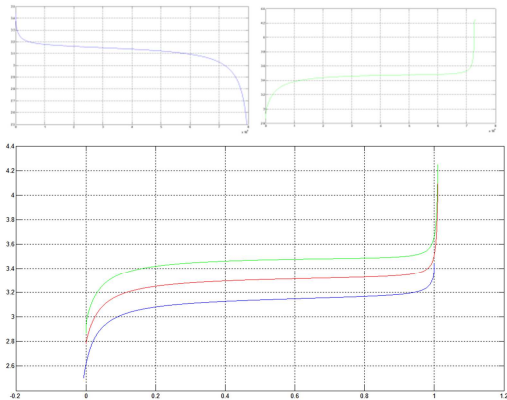
(8.) képletben **Eff** a töltési határfok, a megadott körülmények (áram, hőmérséklet, stb.) által meghatározott kapacitás és az 1C töltési áramon mért kapacitás hányadosa. Mivel a töltési határfok a jelenleg vizsgált tartományban (0,5-2C) nem tér el jelentősen az 1C kisütő áramhoz képest [12.], ezért első közelítésben el is hanyagolhatjuk. Meg kell még jegyezni,

hogyan modellünk még nem veszi figyelembe a hőmérséklet és az öregedés hatásait. Töltéskor és kisütéskor ugyanazokat az ellenállásértékeket használtuk. A töltés-kisütés közötti váltás a 16. ábrán látható.



16. ábra: A töltés-kisütés közötti váltás az SOC alrendszerben

A modell tesztelésére Scriptet készítettünk, amely egy megadott áramnál vizsgálja a kisütést 100% SOC-ról és a töltést 0% SOC-ról. Diagramban ábrázolja a feszültség-idő, valamint a feszültség-SOC diagramokat.



17. ábra: Feszültség-idő és Feszültség-SOC diagramok 0,5C kisütő áramnál (zöld a töltés, kék a kisütés, piros a VOC)

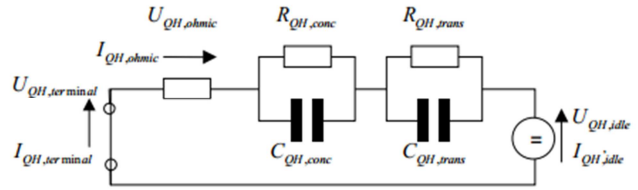
A diagramokból látható, hogy a modell megfelelően működik, kezeli a hiszterézis effektust is, így a valóságnak megfelelően a feszültség töltéskor nagyobb, kisütéskor kisebb, mint a nyugalmi feszültség. Eltérések a végpontok között azért lehetnek, mert ugyanazokat az ellenállásértékeket használtuk töltéskor és kisütéskor.

5. TÖBBVÁLTOZÓS PARAMÉTEREKSEL DOLGOZÓ MODELL

A CRUISE szimulációs szoftver beépített akkumulátor modellje, az egyik általánosan használt modell. A modellünket ezért először az általunk szimulációkhoz használt Cruise modellhez képest is megvizsgáltuk.

Megállapítottuk, hogy a Cruise modell felépítése hasonló az általunk felépített modellhez, de

- a Cruise modell figyelembe veszi a hőhatásokat is,
- ugyanakkor a modell működését leíró paraméterek között nem szerepelt a Peukert konstans.



18. ábra: A Cruise beépített akkumulátor modellje

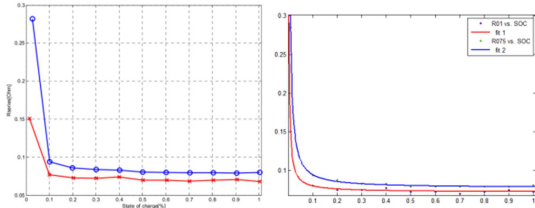
A szakirodalom tanulmányozása során [5.] kiderült, hogy a paraméterek értéke nemcsak a SOC, hanem a kisütő áram függvénye is. A Peukert effektust valószínűleg ezért nem implementálták a modellbe.

Kitűztük egy többváltozós paraméterekkel dolgozó akkumulátor modell készítését is. Így mérések alapján tesztelni tudjuk, hogy elegendő-e csak a Peukert effektust figyelembe venni vagy valóban szükséges a kétváltozós ellenállások modellezése.

A kétváltozós függvényeket Simulink környezetben többféleképpen is megvalósíthatjuk:

- **switch:** egyszerű, de nagyon megnövelné a modell méretét és nehezen módosítható
- **gain:** ha a belső ellenállás görbéknek ugyanaz az alakjuk, csak el vannak tolvva egymáshoz képest, akkor egy egyszerű szorzóval meg lehetne oldani. Ez a mérések eredménye alapján dől el.
- **függvények szorzata:** nehéz lenne a két függvényt megalkotni, ehhez jelentős matematikai háttérre van szükség.
- **felületillesztés:** a görbeillesztéshez hasonlóan kétváltozós függvény megadása. Hátránya, hogy időigényes lehet, hiszen pontos eredményekhez több C értéken meg kell mérni az ellenállás-SOC görbét. Előnye, hogy egyetlen blokkal meg tudjuk valósítani a kétváltozós függvényt.
- **2D-s lookup table:** ha elegendő mérési pontunk van, pontos lehet, több szakirodalom is ezt használta [11., 17.]
- **Matlab S-function vagy Embedded Matlab Function:** saját függvény készítése Matlab scriptben. Az S function blokk azt is lehetővé teszi, hogy más forráskódú (pl. C) kódot is implementáljunk a modellbe. A munkát nagyban megkönnyítené, hiszen a modell módosításakor csak a kódot kellene változtatni. Egyetlen hátránya, hogy compiler szükséges hozzá.

Első körben a saját függvény írását választottuk, mert ez volt a leggyorsabban tesztelhető módszer. A megvalósításhoz a szakirodalomban található diagramokat vettük alapul [15.]. 850 mAh-s lítium-polimer akkumulátort terhelték 80 mA és 640 mA árammal. Az ellenállás-SOC diagram a 19. ábrán látható:

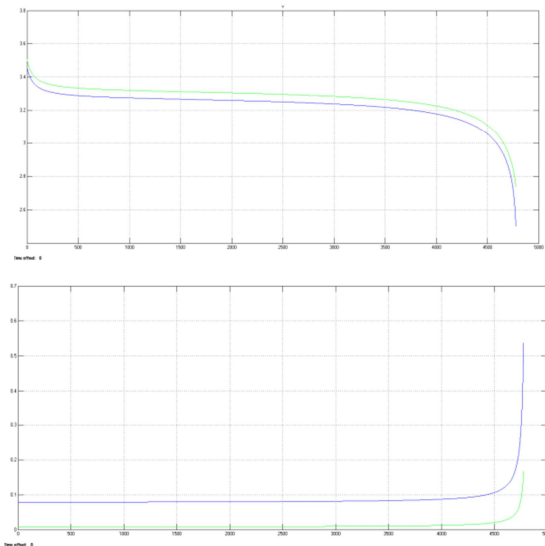


19. ábra: Ellenállás-SOC diagram kétféle terhelésnél [15.]

A diagramból látható, hogy a belső ellenállás különböző kisütő áramoknál más értékű. Ugyanez látható Daowd [5.] diagramjaiban is. Ezt mintaként felhasználva kétféle változós modellt valósítottunk meg Simulinkban.

A modellt leegyszerűsítettük, kivettük a tranziens jelenségekért felelős RC köröket, valamint a Peukert effektust is. Csak a belső Ohmikus ellenállást és a VOC-SOC kapcsolatot hagytuk meg. Hasonlóan a korábbiakhoz a függvényeket görbeillesztéssel határoztuk meg. A két görbének hasonló jellege van, ezért ugyanazzal a függvénnyel közelítettük őket, csak az együtthatók értékét vettük fel eltérően.

A kétféle változós függvényt **embedded Matlab function blokkal** valósítottuk meg. A blokkba írt program elve az, hogy kiszámolja a kisütő áram (C) értékét és annak megfelelően változtatja a függvény együtthatóit. A modellbe beleraktuk azt az esetet is, amikor az ellenállás csak a SOC függvénye (alapul a 0,1 C-t vettem). Mindkét esetben meghatároztuk a feszültség-idő diagramokat 0,75 C kisütő áramoknál. A diagramokon a kék C-től és SOC-től is függ, a zöld csak a SOC-től.



20. ábra: Feszültség-idő diagramok és ellenállás-idő diagramok 0,75C értéknél (a kék a SOC és C függő, a zöld a csak SOC függő ellenállás)

A diagramokból látható, hogy van különbség a görbék között.

Ezzel igazoltuk, hogy miért nem feltétlenül szükséges a modellekbe a Peukert effektust implementálása. A

kétféle változós függvényeket meghatározhatjuk a Matlab Surface Fitting Toolbox-al is.

Mérések alapján felvehető az ellenállás változása különböző kisütő áramok esetén. Az így megvalósított modellt tervezzük összehasonlítani a Peukert effektust figyelembe vevő modellel. Ha a Peukert effektussal dolgozó modell nem tér el jelentősen a kétféle változós ellenállás modelltől, akkor a későbbiekben az egyszerűbb kezelhetőség miatt az előbbi fogjuk használni. A Peukert effektust figyelembe vevő modell ugyanis nagymértékben meggyorsítja a munkát,

hiszen nem kell minden kisütő áramnál meghatározni az ellenállások értékét.

Elméletileg a Peukert effektus értéke függ a hőmérséklettől is [20.], így a hőmodell esetén is tudnánk egyszerűsíteni egy konstans változtatásával.

A Peukert effektust figyelembe vevő modell újszerű, hiszen a legtöbb létező modell kétféle változós ellenállásokkal dolgozik. Az általunk felállított modell előnyei az általánosan használt, többváltozós paraméterekkel dolgozó modellekhez képest:

- egyszerű,
- egyetlen változó paramétert használ,
- könnyen kezelhető és bővíthető bármely terhelési esetre.

6. MODELL VALIDÁLÁSA

A modellek validálásához első körben a konstans áram-konstans feszültség tesztet kell elvégezni. A paraméterek értékét meg kell határozni 0,5C, 1C és 2C, 5C, stb. kisütő áram esetén.

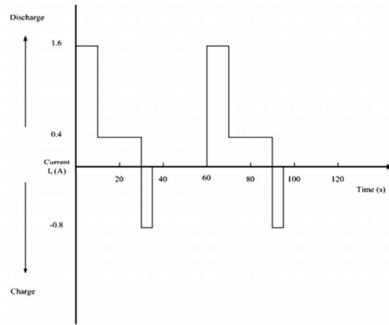
Az általunk felvetett Peukert konstanssal dolgozó modellnél az ellenállásértékeket csak 1C értéken határozzuk meg, valamint a Peukert konstans értékét Simulink Parameter Estimation Toolbox segítségével.

Más kisütési áramoknál is meg kell mérni a kisütési görbéket, a többváltozós paraméterekkel dolgozó modellnél pedig meg kell határozni az ellenállások értékeit is.

A szimulációs eredményeket egymással és a mérési görbékkel történő összehasonlításából derül ki, az általunk felállított modell pontossága.

A modell validálását töltésre is el kell végezni, de ekkor a Peukert konstans helyett a töltési hatásfokot kell figyelembe venni, elsősorban a nagy töltési áramoknál.

A két modellt más terhelésekre is célszerű megvizsgálni: ilyen például a „Dynamic Discharge Performance Test”, amely az elektromos jármű valós üzemviszonyait írja le.



21. ábra: A „Dynamic Discharge Performance Test” profilja [12.]

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A projekt keretében elektromos járművekben alkalmazható lítium akkumulátor Simulink modellje készült el. A szükséges paramétereket mérési eredményekből, valamint Simulink segítségével határoztuk meg. A modell pontosabbá tételéhez és validálásához további mérések szükségesek.

A modellt kibővítettük a töltési és kisütési folyamat közötti váltással és többváltozós paraméterekkel is. Újszerű modellt dolgoztunk ki, amely a Peukert effektust is figyelembe veszi, így lehetőségünk van egyszerű, csak a Peukert konstans változtatásával dolgozó akkumulátor modell megalkotására.

Az új modell alkalmazhatóságát mérésekkel kell alátámasztanunk, ez a további kutatások programjában szerepel. A modellt ennek alapján továbbfejleszthető, de ehhez több terhelési esetre is szükséges méréseket végezni.

További fejlesztési lehetőség és irány a modell kiegészítése az öregedési és hőtani jelenségek figyelembe vételével.

Az elkészült modellt más szimulációs környezetben is kívánjuk használni. A végső cél olyan komplex akkumulátor modell kifejlesztése, amellyel adott elektromos hajtású jármű valódi üzemeltetési hatásai vizsgálhatók, a megfelelő akkumulátor csomag kiválasztása érdekében

TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0012: Hibrid és elektromos járművek fejlesztését megalapozó kutatások - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

„TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012: „Smarter Transport” - Kooperatív közlekedési rendszerek infokommunikációs támogatása - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

8. FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM

- [1]. Abu-Sharkh, S., Doerffel, D.: Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 130 (2004), p.266–274
- [2]. AVL Cruise Version 2011 User’s guide, 5-173-5-180

- [3]. Benger, R., Wenzl, H., Beck, H.P., Jiang, M., Ohms, D., Schaedlich, G.: Electrochemical and thermal modeling of lithium-ion cells for use in HEV or EV application, *World Electric Vehicle Journal Vol. 3* - ISSN 2032-6653 (2009)
- [4]. Chen, M., Rincón-Mora, G.A: Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V performance, *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 21 No. 2, 2006, p.504-511.
- [5]. Daowd, M., Omar, N., Verbrugge, B., Van Den Bossche, P., Van Mierlo, J.: Battery Models Parameter Estimation based on Matlab/Simulink, *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, Shenzhen 2010
- [6]. Doerffel, D., Abu-Sharkh, S.: A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 155 (2006), p.395–400
- [7]. EETimes internetes újság cikkje: http://www.eetimes.com/ContentEETimes/Documents/Schweber/C0792/C0792-1_15.pdf
- [8]. Gao, L., Liu, S., Dougal, R.A.: Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation, *IEEE Transactions on components and packaging technologies* Vol. 25 No. 3 2002, p.495-505
- [9]. Gomadam, P.M., Weidner, J.W., Dougal, R.A., White, R.E.: Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems, *Journal of Power Sources* 110 (2002), p.267–284
- [10]. Hageman, S.C.: Using PSpice to Simulate the Discharge Behavior of Common Batteries http://www.etf.unssa.rs.ba/~slubura/diplomski_rado vi/Zavrzni_rad_MarkoSilj/Literatura/modeli%20baterija%20IEEE/Using%20PSpice%20to%20simulate%20discharge%20behavior%20of%20common%20batteries.pdf
- [11]. Knauff, M., McLaughlin, J., Dafis, C., Niebur, D., Singh, P., Kwatny, H., Nwankpa, C.: Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed, *IEEE Electric Ship Technologies Symposium - ESTS*, Arlington 2007, p. 421-427
- [12]. Omar, N., Daowd, M., Hegazy, O., Mulder, G., Timmermans, J.M., Coosemans, T., Van den Bossche, P., Van Mierlo, J.: Standardization Work for BEV and HEV Applications: Critical Appraisal of Recent Traction Battery Documents, *Energies (19961073) Vol. 5. Issue 1* (2012), p.138
- [13]. Plett, G.L: Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 3. State and parameter estimation, *Journal of Power Sources* 134 (2004), p.277–292

- [14]. Rahimi-Eichi, H., Chow, M.Y.: Adaptive Parameter Identification and State-of-Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries, *38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal 2012
- [15]. Sarasua, A.E., Molina, M.G., and Mercado, P.E.: Dynamic Modelling of Advanced Battery Energy Storage System for Grid-Tied AC Microgrid Applications, *Energy Storage - Technologies and Applications*, InTech, 2013, p.295-320
- [16]. SmartGauge Electronics
http://www.smartgauge.co.uk/peukert_chg.html
- [17]. Tang, X., Mao, X., Lin, J., Koch, B.: Li-ion Battery Parameter Estimation for State of Charge, *American Control Conference*, San Francisco, 2011
- [18]. Tremblay, O., Dessaint, L., Dekkiche, A.: A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, Arlington, 2007, pp. 284 – 289.
- [19]. Untener K., Gajdáty G., Kokavec J., Mihálffy T., Juhász Á.: Járműakkumulátorok modellezése és szimulációja, *A jövő járműve 2007-1-2*, p.50-53.
- [20]. Wu, G., Lu, R., Zhu, C., Chan, C.C: Apply a Piece-wise Peukert's Equation with Temperature Correction Factor to NiMH Battery State of Charge Estimation, *Journal of Asian Electric Vehicles Vol. 8 No. 2*, 2010, p. 1419-1423
- [21]. Wu, T., Liu, L., Xiao, Q., Cao, Q., Wang, X.: Research on SOC Estimation Based on Second-order RC Model, *Journal of Asian Electric Vehicles Vol. 8 No. 2* (2010), p.1419-1423.
- [22]. Zhang, C., Liu, J., Sharkh, S.M., Zhang, C.: Identification of Dynamic Model Parameters for Lithium-Ion Batteries used in Hybrid Electric Vehicles
http://eprints.soton.ac.uk/73265/1/Identification_of_Dynamic_Model_Parameters_for.pdf